

Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Ing. Huaren Wu

der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Ilmenau

eingereichte Dissertation

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. D. Stade, Analytic Power Technology AG
Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Berger, TU Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. A. Thess, TU Ilmenau

eingereicht am 26. März 2004
verteidigt am 09. Juli 2004

Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen
im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer

Danksagung

Für ihre bereitwillige Unterstützung beim Zustandekommen dieser Arbeit möchte ich mich bei allen Kollegen des Fachgebietes Elektrische Energieversorgung, insbesondere bei meinem Betreuer Herr-Prof. Dr. habil. D. Stade und dem Leiter(k) des Fachgebietes Elektrische Energieversorgung Herrn Dr. H. Schau recht herzlich bedanken.

Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen
im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer

Kurzfassung

Titel: Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer

Verfasser: Dipl.-Ing. Huaren Wu

Umfang: 128 Seiten; 88 Abbildungen; 55 Literaturen

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Ilmenau

Die vorliegende Arbeit trägt zur Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer bei.

Zur Aufstellung der Zustandsgleichungen des Elektroenergieversorgungssystems wird ein Algorithmus abgeleitet. Dieser enthält die Formulierung des Normalbaums, die Bildung der Inzidenzmatrix, die Ableitung der Schnittmatrix und die Formulierung der Zustandsgleichungen.

Ein mathematisches Modell wird bezüglich der dreipoligen Lichtbogenspannungen abgeleitet. Dieses Modell beschreibt die logische Beziehung zwischen Lichtbogenspannungen und Leiterströmen.

Für zwei bestehende Strukturen von Flüssigmetallstrombegrenzern wird das jeweilige Temperaturfeld berechnet, um die Abhängigkeit des Betriebsverhaltens des Begrenzers von der Temperatur des Flüssigmetalls beschreiben zu können. Durch die Analyse der Änderung der Temperatur und des Stromverlaufs wurden die verschiedenen Strombegrenzungsprinzipien der zwei Strukturen ermittelt.

Die Berechnung des Pinch-Effekts mit einem neuen Modell wird ausführlich beschrieben. Die Wandeffekte des Kanals werden berücksichtigt. Zur Berechnung der magnetischen Kraftdichte werden gemessenen Ströme herangezogen. Die im numerischen Berechnungsmodell verwendeten wesentlichen Programmbefehle werden benannt und erklärt. Die Feldverteilungen und die Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit des Flüssigmetalls werden beschrieben.

Ein Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers wird aufgestellt. Die Parameter werden auf der Grundlage experimentell ermittelter Werte und mittels der Feldberechnung bestimmt. Das Modell an sich beschreibt den nichtlinearen Widerstand des Flüssigmetallstrombegrenzers. Zum Nachweis der Genauigkeit des Modells wurden die simulativ ermittelten Ströme mit denen, die gemessenen wurden, verglichen.

Das Programm LBKSTools wurde auf der Basis von VC++ erstellt. Es ist in der Lage, die Ströme sowohl bei metallischen Kurzschlüssen als auch bei Lichtbogenkurzschlüssen im Energieversorgungssystem zu berechnen. Das System besteht aus Kondensatoren, Filter, Leitungen, Kabel, Drosseln, Belastungen, Netzeinspeisungen, Transformatoren, Synchronmaschinen and Asynchronmaschinen. Das Programm kann Systeme mit beliebig komplizierten Strukturen analysieren.

Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen
im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer

Abstract

Title: Calculation of the short-circuit currents caused by arcing fault in electrical power systems with liquid metal current limiters

Author: Dipl.-Ing. Huaren Wu

128 pages; 88 figures; 55 references

Department of Electrical Engineering and Information Technology,
Ilmenau Technical University

This dissertation presents the calculation of the short-circuit currents caused by arcing fault in electrical power systems with liquid metal current limiters.

An algorithm is derived for formulating state equation for the electrical power systems. This algorithm includes the formulation of a modified proper tree, the formulation of an incidence matrix, the formulation of a cutset matrix and the formulation of state equation.

A mathematical model based of arc voltages is derived. This model reflects the relations among arc voltages and short-circuit currents. It can be used to calculate minimal short-circuit currents caused by arcing fault.

The temperature fields of two liquid metal current limiters with different structures were calculated separately in order to describe the dependence of operating behaviour of the current limiters on the temperature of the liquid metal in the current limiters. The different principles of the current limit of the two structures are explained by analysing the temperature of the liquid metal and the short-circuit current flowing through the current limiters.

The calculation of pinch effect with a new model is described in detail. The influence of the wall of the canal on the flow of the liquid metal was considered in calculation. The measured short-circuit currents were used to simulate the magnetic force. The ANSYS commands in the program calculating the pinch effect are explained. The fields calculated are given.

A resistance model of the liquid metal current limiter is derived. The parameters of the model were determined according to the results of the calculations and experiments. A comparison between results of simulations and experiments is made to prove the precision of the model.

A program was written with VC++. It can calculate the short-circuit currents in any electrical power system consisting of capacitors, filters, lines, cables, reactors, loads, network supply, transformers, synchronous machines and asynchronous machines.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Einführung in die Problematik	5
1.2	Stand der Technik	7
1.2.1	Lichtbogenkurzschlußstromberechnung	7
1.2.2	Bekannte Flüssigmetallstrombegrenzer	10
1.3	Ziel der Arbeit	12
2	Modelle der Betriebsmittel	13
2.1	Basiszweige	14
2.1.1	C-Basiszweig	14
2.1.2	R-Basiszweig	14
2.1.3	R-L-M-e-Basiszweig	14
2.1.4	Spannungsquellen-Basiszweig	15
2.1.5	Stromquellen-Basiszweig	15
2.2	Modelle der Betriebsmittel	16
2.2.1	Kondensator	16
2.2.2	Filter	16
2.2.3	Leitungen und Kabel	16
2.2.4	Netzeinspeisung	16
2.2.5	Transformator	16
2.2.6	Synchronmaschine	17
2.2.7	Asynchronmaschine	19
2.2.8	Störlichtbogen	20
3	Zustandsgleichung des Systems	23
3.1	Algorithmus zur Formulierung des Normalbaums	23
3.2	Algorithmus zur Formulierung der Inzidenzmatrix	26
3.3	Algorithmus zur Formulierung der Schnittmatrix	27
3.4	Formulierung der Zustandsgleichung	27
4	Rechenprogramm	33
4.1	Berechnungsablauf	33

4.2	Beispiele	35
4.2.1	Metallischer Kurzschluß	35
4.2.2	Lichtbogenkurzschluß	35
4.2.3	Berechnung des Kurzschlußstroms im Elektroenergieversorgungssystem	37
5	Einsatz von Flüssigmetallstrombegrenzern	41
6	Temperaturfeldberechnung	47
6.1	Grundgleichungen der Wärmeübertragung	47
6.1.1	Wärmeleitung und Konvektion	47
6.1.2	Wärmestrahlung	49
6.2	PLANE67 2D Thermisch-elektrisches Element	49
6.3	GaInSn-Strombegrenzer	50
6.3.1	Geometrie des GaInSn-Strombegrenzers	50
6.3.2	Idealisierung	50
6.3.3	Auswertung des Ergebnisse	51
6.4	Hg-Strombegrenzer	54
7	Magnetfeldberechnung	57
7.1	Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes	57
7.2	SOLID97 3D magnetisches Volumenelement	59
7.3	INFIN111 3D Infinites Randelement	59
7.4	Magnetfeldberechnung	60
7.4.1	Idealisierung	60
7.4.2	Auswertung des Ergebnisse	61
8	Fluiddynamikberechnung	67
8.1	Die Kontinuitätsgleichung	67
8.2	Die Impulsgleichung	68
8.3	Die inkompressible Energiegleichung	69
8.4	Turbulenz	69
8.5	Druck	69
8.6	FLUID142 3D Fluid-thermisches Element	70
8.7	Fluiddynamikberechnung	71
8.7.1	Idealisierung	71
8.7.2	Auswertung der Ergebnisse	72
9	Pinch-Effekt-Berechnung	77
9.1	Idealisierung	77
9.2	Auswertung der Ergebnisse	78

10 Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers	87
10.1 Widerstands-Modell	87
10.2 Auswertung des Modells	88
10.3 Parameter des Modells für andere Radien des Kanals	90
11 Anwendung des Flüssigmetallstrombegrenzers	93
11.1 Begrenzungseigenschaft	93
11.2 Begrenzung und Selektivität	93
11.3 Anzahl der Diaphragmen	97
11.4 Leistungsverlust	98
11.5 Strombegrenzer und Störlichtbogenkurzschluß	99
11.6 Einsatz	100
12 Zusammenfassung und Ausblick	103
Formelzeichen	
Anhang	
Literaturverzeichnis	
Erklärung	
Thesen	

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung in die Problematik

Industriebetriebe, Privathaushalte und andere Verbraucher sind bekanntlich in zunehmendem Maße von der elektrischen Energie abhängig. Der Versorgung der Abnehmer mit elektrischer Energie dienen die Elektroenergiesysteme. An diese Elektroenergiesysteme werden eine Vielzahl von Forderungen, wie beispielsweise die Sicherung der Elektroenergiequalität, gestellt. Eine wesentliche Bedeutung kommt der kontinuierlichen Versorgung der Abnehmer mit Elektroenergie zu, da Unterbrechungen in der Regel immer zu erhöhten Kosten in der industriellen Produktion und im Privatbereich zu Einschränkungen in der Lebensqualität führen. Unterbrechungen der Elektroenergieversorgung werden durch unterschiedliche Fehler verursacht. Dabei ist der Kurzschluß einer der bedeutendsten und schwersten Fehler. Er bedingt nicht nur die Abschaltung der beteiligten Netz- und Anlagenteile, sondern führt oftmals zu irreversiblen Schäden der Betriebsmittel. Da das Leistungs-Volumen-Verhältnis von elektrischen Anlagen durch verschiedene Maßnahmen ständig verbessert wird und immer höhere Kurzschlußleistungen installiert werden, steigen in gleichem Maße die Auswirkungen von Kurzschlüssen. Im Niederspannungsbereich liegen die Kurzschlußströme bei 100 kA und höher. Kurzschlüsse sind im Allgemeinen mit dem Ent- und Bestehen eines Lichtbogens, auch Störlichtbogen genannt, zwischen den betroffenen Anlagenteilen verbunden [1]. Statistisch handelt es sich bei ca. 80 bis 95 % der Kurzschlüsse um Lichtbogenkurzschlüsse [4].

Störlichtbögen haben in der Regel folgende Auswirkungen[2, 3]:

- Durch den Fußpunkteffekt verschmelzen die Metallteile der betroffenen elektrischen Anlagen.
- Aufgrund der entstehenden, außerordentlich hohen Temperaturen kommt es neben der Verbrennung nichtmetallischer Anlagenteile zu einem hohen Druckanstieg.

Die Entstehung von Fehlern in elektrischen Versorgungssystemen wird immer ein permanentes Problem darstellen, da die auslösenden Ursachen wie zum Beispiel menschliches

Versagen, Materialfehler, unsachgemäße oder mangelnde Wartung und andere objektive äußere Einwirkungen nicht vollständig zu vermeiden sind. Deshalb besteht bekanntermaßen die Forderung, Anlagenteile, die von einem Kurzschluß betroffen sind, innerhalb kürzest möglicher Zeit ab- bzw. freizuschalten, um u.a. die zerstörende Lichtbogenwirkung zu verhindern oder zu minimieren. Um die für die Abschaltung eingesetzten Schutzgeräte zielgerichtet einstellen zu können, müssen dem Grundsatz nach die zeitlichen Verläufe der Kurzschlußspannungen und -ströme bekannt und mathematisch berechenbar sein. Die Berechnung der Kurzschlußströme wurde in einer Reihe von Veröffentlichungen behandelt [1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Ein Modell wurde zur Beschreibung von Störlichtbögen in Drehstrom-Niederspannungsanlagen entwickelt [13, 14, 15]. Allerdings ist die rechentechnische Umsetzung in Form einer entsprechenden Software des in [13] dargestellten Modells zur Berechnung von Lichtbogenkurzschlüssen in komplizierten Energieversorgungssystemen bisher nicht erfolgt. Da der elektrische Widerstand eines Lichtbogens nichtlinearen und zeitinvarianten Charakter besitzt, und sich die Struktur von Elektroenergieanlagen oftmals als sehr verzweigt und kompliziert darstellt, ist die Erarbeitung eines entsprechenden Rechenprogramms zwingend notwendig.

Zur Begrenzung von Kurzschlußströmen besteht die Möglichkeit, Flüssigmetallstrombegrenzer in elektrische Versorgungsanlagen einzufügen, deren Hauptbestandteil ein spezielles Flüssigmetall ist. Will man für diesen Fall den zeitlichen Verlauf des Lichtbogenkurzschlußstroms berechnen, ist die modellmäßige Beschreibung des Flüssigmetallstrombegrenzers einschließlich der Bestimmung dessen physikalischer Parameter erforderlich.

Bereit in den 70er Jahren liefern Versuche, Flüssigmetallstrombegrenzer mit Quecksilberfüllung [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]. Seit einigen Jahre hat man sich auf die Füllung mit einer Legierung bestehend aus Gallium, Indium und Zinn konzentriert (im Weiteren mit GaInSn bezeichnet) [33, 34, 36, 37]. Der den Flüssigmetallstrombegrenzer durchfließende Strom hat auf das Flüssigmetall thermische und elektrodynamische Wirkungen. Wenn bei ausreichend hohem Strom die Temperatur des Flüssigmetalls den Siedepunkt der Legierung übersteigt, so verdampft diese, und es entsteht ein Lichtbogen. Dieser wirkt strombegrenzend. Die strombegrenzende Wirkung des Flüssigmetalls wird auch durch den Pinch-Effekt bedingt. Das heißt, der das Flüssigmetall durchfließende Strom erzeugt ein magnetisches Feld. Dieses Magnetfeld bewirkt die Einschnürung, also die Abnahme des leitfähigen Querschnittes der Legierung. Damit erhöht sich der Widerstand des Flüssigmetalls, und es stellt sich ein strombegrenzender Zustand ein.

Bezüglich der Eigenschaften bzw. des Betriebsverhaltens des Flüssigmetallstrombegrenzers sind folgende Aussagen von Interesse:

- der Einfluß des Pinch-Effekts und des Lichtbogens auf die strombegrenzende Wirkung
- der Einfluß der konstruktiven Beschaffenheit des Begrenzers und der Art der Flüssigmetalle auf den Lichtbogen und/oder den Pinch-Effekt.

Daraus ergibt sich die Forderung nach der Berechnung des Temperaturfeldes und des 3D

Pinch-Effekts im Flüssigmetallstrombegrenzer auf der Grundlage eines entsprechenden physikalischen Modells bezüglich einer festzulegenden Näherungsstufe, der erforderlichen Parameterbestimmung sowie der rechentechnischen Umsetzung insgesamt.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Lichtbogenkurzschlußstromberechnung

(a) Modellbildung

Kurzschlüsse in elektrischen Netzen unterscheidet man in dreipolige, zweipolige ohne Erdberührung, zweipolige mit Erdberührung und einpolige. Der dreipolige metallische Kurzschluß ist ein symmetrischer Kurzschluß und kann mit einfachen Mitteln beschrieben bzw. berechnet werden. Dazu wird das symmetrische Netz auf einen einzigen Leiter reduziert. Es wird die Ersatzschaltung des Netzes gebildet. Die Ersatzschaltung wird vereinfacht und der Effektivwert des dreipoligen Kurzschlusses berechnet.

Die Analyse der Effektivwerte unsymmetrischer Kurzschlüsse erfolgt mit Hilfe der symmetrischen Komponenten. Nach dieser Methode wird das unsymmetrische System der drei Ströme oder Spannungen als Überlagerung dreier symmetrischer Systeme aufgefaßt. Diese drei symmetrischen Systeme sind das Mitsystem, das Gegensystem und das Nullsystem. Man bildet die Ersatzschaltungen des Mitsystems, des Gegensystems und des Nullsystems, vereinfacht die Ersatzschaltungen und berechnet die drei Ströme. Daraus erhält man die Stromeffektivwerte des unsymmetrischen Kurzschlusses nach der Überlagerung der Ströme von Mitsystem, Gegensystem und Nullsystem. Der Kurzschlußstrom komplizierter Netze wird durch die Lösung algebraischer Gleichungssysteme auf rechentechnischer Basis ermittelt. Das Kernstück der Methode besteht darin, die Impedanzmatrix bzw. die Admittanzmatrix des Netzes zu bilden [1, 11, 16].

Lichtbogenkurzschlüsse in Drehstrom-Niederspannungsanlagen wurden analysiert und ermittelt, dass die Ursache von etwa 80% aller Störungen in der Elektroenergieversorgung Kurzschlüsse sind [4]. In der Mehrzahl (80 bis 95%) handelt es sich dabei um Lichtbogenkurzschlüsse. Daraus folgt, dass die analytische Behandlung des Lichtbogens in die Kurzschlußstromberechnungen einbezogen werden muß.

Ein Störlichtbogen hat prinzipiell die Eigenschaft eines elektrischen Widerstandes. Dabei wird im einfachsten Fall ausgegangen, dass sich der Lichtbogen wie ein konstanter elektrischer Widerstand verhält. Unter dieser Voraussetzung kann man den Effektivwert der Kurzschlußstrom mit Hilfe der oben benannten Methode berechnen.

Das Modell eines Störlichtbogens in Drehstrom-Niederspannungsanlagen auf dieser Basis besteht darin, dass dieser durch einen 15 m Ω -Widerstand ersetzt wird [17]. Das Modell bietet zwar die Möglichkeit der Simulation der strombegrenzenden Wirkung eines Lichtbogens, vernachlässigt jedoch den Einfluß der Lichtbogenlänge auf den Kurzschluß-

strom.

Russische Wissenschaftler haben eine Reihe von Untersuchungen mit Lichtbogenkurzschlüssen durchgeführt [17] und aufgrund der experimentellen Ergebnisse eine empirische Formel zur Berechnung der Lichtbogenwiderstände R_g ermittelt.

Die Formel ist:

$$R_g = 1050 [V/m] L_g [m] / I_g [A]$$

mit

I_g - Effektivwert des Lichtbogenstroms

L_g - Lichtbogenlänge

Dieses Modell berücksichtigt die Wirkung der Lichtbogenlänge auf den Kurzschlußstrom. Da der elektrische Widerstand des Modells als konstant betrachtet wird, ist der zeitliche Verlauf der berechneten Lichtbogenspannung sinusförmig. Dies weicht von der real auftretenden Spannungsform ab.

Um die Schutzgeräte der Energieversorgungssysteme besser auszulasten bzw. besser einstellen zu können, ist es notwendig, die Näherungsstufe des konstanten Widerstandes zur Nachbildung von Störlichtbögen zu verlassen. Dies führt zur dynamischen Beschreibung des Lichtbogens.

Hierzu kann das dynamische Verhalten des Lichtbogens durch die Hochrainersche Gleichung beschrieben werden. Diese lautet [18]:

$$dg/dt = (G - g) / \tau$$

mit

g - Momentanleitwert des Lichtbogens

G - stationärer Leitwert des Lichtbogens

τ - Zeitkonstante des Lichtbogens

Aus der Hochrainerschen Gleichung entwickelten M. Kizilcay und K.-H. Koch ein Lichtbogenmodell. Dazu führten sie vorbereitend über 200 Versuche mit Lichtbogenkurzschlüssen in Hochspannungsnetzen durch. Aus den Ergebnissen berechneten Sie die Parameter des Modells als Grundlage einer entsprechenden numerischen Simulation des Störlichtbogens. Das Ergebnis der Rechnungen waren die zeitlichen Verläufe der Lichtbogenspannungen und -ströme.

Das Verhalten von Hochspannungslichtbögen weicht von dem der Lichtbögen, die in Niederspannungsanlagen auftreten, ab. Das bedeutet, dass sich dieses Modell nicht für die Nachbildung von Niederspannungslichtbögen eignet.

Bei der Untersuchung von Lichtbogenkurzschlüssen in Drehstrom-Niederspannungsanlagen haben Prof. Stade und Dr. Schau ermittelt, dass es Grenzabstände gibt, bei deren Überschreitung das Entstehen von Störlichtbögen in der betreffenden Anlage ausgeschlossen werden kann [13, 14, 15]. Zudem wurde ein Strombegrenzungsfaktor ermittelt, der das Verhältnis des Kurzschlußstroms unter Berücksichtigung des Störlichtbogens zum mini-

malen dreipoligen metallischen Kurzschlußstrom angibt. Dieser Faktor ist abhängig von der Netzennspannung, den geometrischen Anlagengröße und dem Resistanz/Reaktanz-Verhältnis des Netzes. Weiterhin geben sie ein Ersatzschaltbild für die Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Kurzschlußstroms an. Der Störlichtbogen wird als nichtlineares und zeitvariantes Netzelement betrachtet und als Ersatzlichtbogenspannung in dem benannten Ersatzschaltbild berücksichtigt. In guter Näherung wird diese Spannung innerhalb der einzelnen Brennintervalle durch jeweils konstante Spannungswerte beschrieben, deren Vorzeichen der Polarität des fließenden Stroms entspricht. Die Lichtbogenspannung ändert sich statistisch. Die diesbezügliche Verteilung wurde experimentell ermittelt. Dabei beschreibt der 80%-Wert die Grenze zwischen stabilem und instabilem Brennverhalten des Lichtbogens und wird deshalb für die Berechnung des minimalen Lichtbogenkurzschlußstroms benutzt.

(b) Simulationsprogramm

EMTP ist eine weltweit bekannte und benutzte Software zur Systemsimulation. Sie besitzt den Vorteil, Integrationsverfahren und Problemformulierungen kombiniert in einem Algorithmus ausführen zu können [19]. EMTP formuliert die Differentialgleichungen des Netzes, legt die Gleichungen in einem zu lösenden kohärenten System ab und löst die Gleichungen auf numerischem Wege. Die EMTP-Methode basiert auf der Diskretisierung der Systemgleichungen der elektrischen Anlagen und definiert einen vorbestimmten Zeitschritt. Die Gleichungen werden dann nach dem Prinzip der Knotenspannungsanalyse gelöst. Die Zweigelemente werden durch die Beziehung zwischen dem Zweigstrom und der Knotenspannung dargestellt. Das EMTP Programm kann elektromagnetische transiente Vorgänge berechnen. Allerdings kann das in [13] dargestellte Modell damit nicht ohne weiteres umgesetzt werden. Man muß Codes schreiben, um Lichtbogenkurzschlußströme mit EMTP zu berechnen.

Dagegen kann das an der TU Ilmenau entwickelte Simulationssystem SALOMON das in [13] dargestellte Modell umsetzen [20] und die Lichtbogenkurzschlußspannungen und -ströme in Niederspannungsnetzen berechnen. Allerdings gibt es Einschränkungen bei vermaschten Netzen und bei der Behandlung metallischer Kurzschlüsse.

Prof. Rajagopalan hat einen Algorithmus entwickelt, um die Zustandsgleichungen von Leistungselektroniksystemen zu lösen [21]. Der Algorithmus wendet den Netzgraph auf das elektrische Netz an. Er beinhaltet folgende Schritte:

- Suche nach dem Normalbaum,
- Bildung der Inzidenzmatrix,
- Ableitung der Schnittmatrix aus der Inzidenzmatrix,
- Formulierung der Zustandsgleichungen nach der Schnittmatrix und elektrischen Zweiggleichungen,
- Lösung der Zustandsgleichungen.

Die Zustandsvariablenmethode ist exakter und gut geeignet für sich zeitlich ändernde Strukturen, insbesondere für Leistungselektronikanlagen [19]. Diese Methode erfordert jedoch eine Erweiterung, um die Zustandsgleichungen von Energieversorgungssystemen lösen zu können.

1.2.2 Bekannte Flüssigmetallstrombegrenzer

In den 70er Jahren erprobten N.D. Jones and L.P. Harris eine Selbstregenerierungssicherung auf der Basis von Quecksilber als Flüssigmetall [25]. Kenngrößen und Verhalten der Sicherung lassen sich kurz wie folgt beschreiben:

Der Nennstrom der Sicherung beträgt 15 A bei einer Nennspannung unter 100 V. Der Flüssigmetallkanal des Sicherungselementes ist etwa 2,8 bis 11,4 mm lang und weist einen Durchmesser von ca. 0,23 bis 0,61 mm auf. Betriebsmäßig verhalten sich die Sicherungen so, dass ca. 0,2 ms nach dem Kurzschluß der Strom auf 180 A angestiegen ist und ein Lichtbogen entsteht. Der Lichtbogen begrenzt den Strom durch die Sicherung auf Werte zwischen 3 und 25 A. Die Löschung des Lichtbogens erfolgt durch äußeres Abschalten des Sicherungszweiges. Nach der Lichtbogenlöschung wird das Quecksilber durch den äußeren Behälter gedrückt und fließt in den Kanal zurück, unterstützt durch einen Balg und eine Feder, die jeweils an den Enden des Kanals angeordnet sind. Nach den Versuchen wurde festgestellt, dass der Kanal erodiert war. Das heißt, der Lichtbogen entstand im Kanal.

B. Hamilton testete fünfzehn Prototypen eines Flüssigmetallstrombegrenzers [23, 28, 29, 31], wobei ebenfalls Quecksilber als Füllmetall verwendet wurde. Der Strombegrenzer wurde für 300 und 600 V und 1000 und 500 A-Gleichstromnetze in der Bergbauindustrie konzipiert. Der Kurzschlußstrom wird auf Werte kleiner als 15500 A begrenzt. Kenngrößen und Verhalten eines einkanalig ausgelegten Prototyps lassen sich wie folgt beschreiben:

Der Kanaldurchmesser beträgt 0,2 bis 1 mm, die Längen variieren zwischen 5 und 120 mm. An je einem Ende des Kanals ist eine Quecksilberkammer und ein Kolben angeordnet. Ein Hilfsschalter überbrückt den Strombegrenzer. Zu dieser Parallelschaltung ist ein Hauptschalter in Reihe angeordnet. Bei normalem Betrieb fließt der größte Teil des Stroms durch den Hilfsschalter. Im Kurzschlußfall schaltet der Hilfsschalter aus, und der gesamte Strom fließt über den Strombegrenzer. Das Quecksilber verdampft, und es entsteht ein Lichtbogen. Indem der Hauptschalter ausgeschaltet wird, verlöscht der Lichtbogen. Die Kolben drücken das Quecksilber in den Kanal zurück. Ein von B. Hamilton aufgenommenes Foto zeigt, dass der Kanal durch den Lichtbogen erodiert und damit in Bezug auf seinen Querschnitt erweitert wurde.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass Flüssigmetallstrombegrenzer mit Quecksilberfüllmetall in der Lage sind, Kurzschlußströme wirksam zu begrenzen, und die Eigenschaft der Selbstregenerierung einen wesentlichen Vorteil darstellt. Von Nachteil ist, dass der Begrenzer für die durch den entstehenden Lichtbogen auftretenden hohen Temperaturen und Drücke ausgelegt sein muß und eine Kanalerweiterung verhindert werden

sollte. Weiterhin sind die toxischen Eigenschaften von Quecksilber schädlich.

Gemäß seiner physikalischen Wirkungsweise kann der Pinch-Effekt zur Begrenzung von Kurzschlußströme eingesetzt werden.

Die Magnetohydrodynamik(MHD) beschäftigt sich u.a. mit dem Pinch-Effekt. Es gibt hierzu bereits wesentliche wissenschaftliche Erkenntnisse [39, 40, 41, 42]. Der Pinch-Effekt kann bei Plasmen und Flüssigmetallen zielgerichtet erzeugt werden. Wenn ein Strom durch einen Leiter fließt, erzeugt er ein Magnetfeld. Die magnetische Kräfte dieses Feldes wirken radial zum Leiter, und zwar in Richtung des Querschnittsmittelpunktes. Bei ausreichend hohem Strom wird der Leiterquerschnitt verringert, wenn es sich um ein Plasma oder ein Flüssigmetall handelt.

Northrop wies 1907 den Pinch-Effekt bei Flüssigmetall experimentell nach [44].

Flüssigmetall, das aus einer Gallium-Indium-Zinn-Legierung (GaInSn) besteht, ist umweltfreundlich. 1982 erfanden Veretenkov A. V. und Nikolaeva L. T. ein Gerät mit GaInSn als Füllmetall [35].

E. Zienicke und A. Thess benutzten die Shallow Water Approximation, um den Pinch-Effekt der Legierung in zylindrischer Form zu analysieren [36]. Für die Berechnung der kritischen Stromdichte wurde eine entsprechende Gleichung abgeleitet, die die abhängigen Größen Radius, Dichte und die Gravitationsbeschleunigung beinhalten. Die Ansprechzeit des Pinch-Effekts beträgt nach diesen Untersuchungen einige Millisekunden für 10 mm Radius und 14000 A Gleichstrom.

In [37] wurde ein Flüssigmetallstrombegrenzer mit der Legierung GaInSn aufgebaut und untersucht. Dieser besteht aus einem isolierenden Gehäuse, welches die Festmetallelektroden aufnimmt und durch eine beliebige Anzahl von Diaphragmenscheiben unterteilt wird. Die sich zwischen den Diaphragmen befindenden Verdichterräume werden teilweise mit Flüssigmetall gefüllt. Die Diaphragmenscheiben können einige Kanäle enthalten. Durch die Kanäle wird eine elektrische Verbindung zwischen den Verdichterräumen realisiert. Der Flüssigmetallstrombegrenzer hat keinen Kolben und keinen Balg. Versuche zeigen, dass der Flüssigmetallstrombegrenzer ca. 2,2 ms nach Kurzschlußbeginn den Kurzschlußstrom begrenzt, unabhängig von der treibenden Netzspannung.

In der Dissertationsschrift [37] hat Andreas Krätzschar die Ergebnisse einer Vielzahl von Experimenten zur Durchführung indirekter Messungen zum Ansprechverhalten von Flüssigmetallstrombegrenzern zusammenfasst. Grundlage der Untersuchungen war ein Hochleistungsbatterieversuchsstand. Die Leerlaufspannung der Batterie betrug 12 V. Der Batterie konnte ein Prüfstrom von 100 A bis 11 kA entnommen werden. Der Strombegrenzer besaß mehrere feste Diaphragmen. Jede Diaphragma wies einen Kanal auf. Als Flüssigmetall wurde GaInSn verwendet. Allerdings zündet nicht in jedem Diaphragma ein Lichtbogen. Neben dem Batterieversuch wurden auch Kurzschlußversuche mit 50 kA und der Spannung von 400 V durchgeführt. In der Arbeit wurden die thermischen, induktiven

und magnetohydrodynamischen Effekte des Strombegrenzers theoretisch und experimentell untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass der Pinch-Effekt immer zuerst auftritt. Das Entstehen eines Lichtbogens ist stets die sekundäre Wirkung.

1.3 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird in einem ersten Schritt ein Simulationsalgorithmus abgeleitet, mit dem Lichtbogenkurzschlußströme berechnet werden können. Er soll auf der Zustandsvariablenmethode basieren, da sich diese Methode für die Simulation sich zeitlich ändernder Netzparameter eignet, vor allem dann, wenn leistungselektronische Anlagen als Verbraucher auftreten. Letzteres ist in zunehmendem Maße der Fall.

Der zu entwickelnde Algorithmus soll in der Lage sein, Energieversorgungssysteme mit beliebigen Strukturen zu analysieren, unabhängig vom Kompliziertheitsgrad.

Er soll weiterhin für die Berechnung sowohl von metallischen als auch von Lichtbogenkurzschlüssen geeignet sein.

Als Programmiersprache wird VC++ verwendet, eine sehr verbreitete Software. Ein mit dieser Computersprache zu entwickelndes Programm wird zur Bestätigung des o.g. Algorithmus herangezogen. Das Programm setzt das in [13] dargestellte Lichtbogenmodell rechentechnisch um und beinhaltet dieses als speziellen Modul.

Um Lichtbogenkurzschlußströme im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer berechnen zu können, wird in einem zweiten Schritt ein Widerstandsmodell des Begrenzers entwickelt, einschließlich der Bestimmung der Modellparameter.

Hierzu werden das Temperaturfeld, das Magnetfeld und die Fluidodynamik im Begrenzer simuliert. Aus der Analyse des Drucks und vorliegender Versuchsergebnisse wird das Begrenzermodell mit den entsprechenden Parametern abgeleitet.

Dabei wird beachtet, dass der Pinch-Effekt turbulente Strömungen im Begrenzer bedingt. Weiterhin werden bei den Berechnungen die Wände und Leerräume des Begrenzers berücksichtigt. Die Berechnung des 3D Pinch-Effekts erfolgt mit dem Programm ANSYS.

Kapitel 2

Modelle der Betriebsmittel

Die Kapitel 2, 3 und 4 beinhalten die Berechnung von Lichtbogenkurzschlussströmen im Elektroenergieversorgungssystem. Einige kommerzielle Softwarepakete EMTP, PSAF, NePLAN und ETAP erlauben es, elektromagnetische transiente Vorgänge zu berechnen. Elektroenergieversorgungssysteme weisen oftmals komplizierte und sich ändernde Strukturen auf. Beispielhaft erfolgt die Berechnung der Lichtbogenkurzschlussströme im Elektroenergieversorgungssystem mit dem Flüssigmetallstrombegrenzer. Dazu ist es nötig, die Lichtbogenspannungen zu berechnen, die Richtungen der Leiterströme und die Wiederzündbedingungen festzulegen. Es hat sich gezeigt, dass die Lösung der spezifischen Probleme des Elektroenergieversorgungssystems mit kommerziellen Softwarepaketen schwierig ist. Mit dem zu schaffenden Simulationsprogramm sollen diese Randbedingungen berücksichtigt werden. Beispielhaft erfolgt die Anwendung dieses in der Dissertation geschaffenen Programms zur Berechnung von Strombegrenzungsvorgängen mittels Flüssigmetallstrombegrenzer im Elektroenergieversorgungssystem.

Die primäre Aufgabe des neuen Computerprogramms besteht in der Unterstützung zur Formulierung der Zustandsgleichung des Energieversorgungssystems. Gleichzeitig muß das Programmsystem so flexibel sein, dass spezielle Probleme der Elektroenergieversorgungssysteme schrittweise ergänzbar und damit lösbar werden.

Wesentliche Anlagen in Energieversorgungssystem sind Leitungen, Kabel, Transformatoren, Kondensatoren, Drosseln, Filter, Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen. Die Anlagen und das Energieversorgungssystem können durch Differentialgleichungen und entsprechende Ersatzschaltbilder beschrieben werden. Die Lösung der Differentialgleichungen liefert Aussagen bezüglich stationärer und transienter Vorgänge in einem Energieversorgungssystem. Es sind mehrere Algorithmen zum Beispiel Runge-Kutta und Adams-Moulton-Methode zur Lösung von Differentialgleichungen bekannt.

In diesem Kapitel werden als erster Schritt sogenannte Basiszweige eingeführt und die Modelle der Betriebsmittel beschrieben. Im nächsten Kapitel wird die Aufstellung der Differentialgleichungen des Systems vorgenommen. Im Kapitel 4 wird ein Rechenprogramm dargestellt.

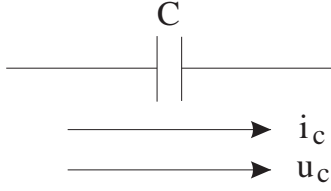


Bild 2.1: C-Basiszweig

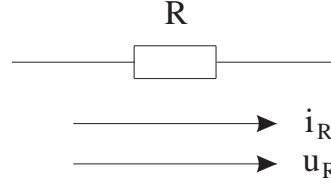


Bild 2.2: R-Basiszweig

2.1 Basiszweige

In diesem Abschnitt werden fünf Arten von Basiszweigen eingeführt. Dies sind der C-Basiszweig, der R-Basiszweig, der R-L-M-e-Basiszweig, der Spannungsquellen-Basiszweig und der Stromquellen-Basiszweig. Jeder Basiszweig besitzt zwei Knoten. Die oben erwähnten Anlagen können durch diese Basiszweige ersetzt bzw. beschrieben werden.

2.1.1 C-Basiszweig

Der C-Basiszweig enthält nur die Kapazität C . Das Bild 2.1 zeigt den C-Basiszweig. Dieser wird durch folgende Differentialgleichung 2.1 beschrieben:

$$C\dot{u}_C = i_C \quad (2.1)$$

2.1.2 R-Basiszweig

Der R-Basiszweig enthält nur den Widerstand R . Das Bild 2.2 zeigt den R-Basiszweig. Dieser wird durch folgende Gleichung 2.2 beschrieben:

$$Ri_R = u_R \quad (2.2)$$

2.1.3 R-L-M-e-Basiszweig

Das Bild 2.3 zeigt 2 R-L-M-Basiszweige mit Gegeninduktivität.

Die Gleichung 2.3 beschreibt n R-L-M-e-Basiszweige.

$$\begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & \dots & M_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \dots \\ \dot{i}_{Ln} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_1 & \dots & \dots & \dots \\ & R_2 & \dots & \dots \\ & & \dots & \dots \\ & & \dots & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ \dots \\ i_{Ln} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ \dots \\ u_{Ln} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ \dots \\ e_{Ln} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

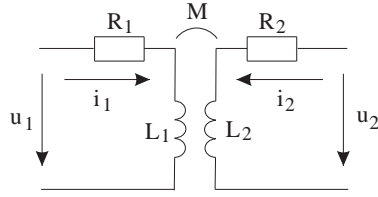


Bild 2.3: R-L-M-Basiszweig

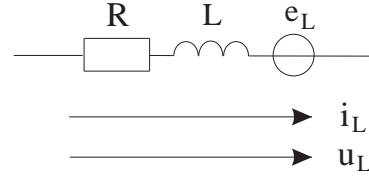


Bild 2.4: R-L-e-Basiszweig

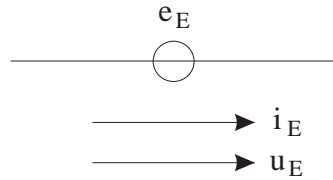


Bild 2.5: Spannungsquellen-Basiszweig

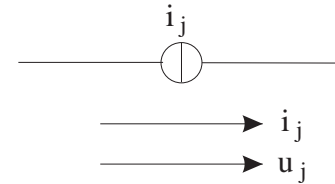


Bild 2.6: Stromquellen-Basiszweig

mit

L_i Selbstinduktivität von Zweig i

M_{ij} Gegeninduktivität zwischen Zweig i und j

i_{Li} Strom von Zweig i

R_i Widerstand von Zweig i

u_{Li} Spannung von Zweig i

e_{Li} Spannungsquelle in Zweig i

Das Bild 2.4 zeigt den R-L-e-Basiszweig. Dieser enthält den Widerstand R, die Induktivität L und die Ursprungsspannung e_L .

Die Ersatzschaltung nach Bild 2.4 wird durch folgende Differentialgleichung befriedigt:

$$L \dot{i}_L = -R i_L + u_L + e_L \quad (2.4)$$

2.1.4 Spannungsquellen-Basiszweig

Der Spannungsquellen-Basiszweig enthält nur die Spannungsquelle e_E . Bild 2.5 zeigt den Spannungsquellen-Basiszweig.

2.1.5 Stromquellen-Basiszweig

Der Stromquellen-Basiszweig enthält nur die Stromquelle i_j und ist in Bild 2.6 dargestellt.

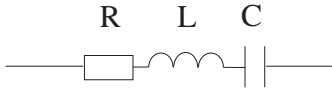


Bild 2.8: Ersatzschaltung des Filters

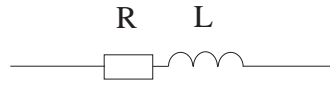


Bild 2.9: Ersatzschaltung für Leitungen, Kabel

2.2 Modelle der Betriebsmittel

Im folgenden Abschnitt werden die Modelle der Betriebsmittel auf der Basis der eingeführten Basiszweige beschrieben.

2.2.1 Kondensator

Das Bild 2.7 zeigt die Ersatzschaltung des Kondensators. Der Kondensator kann durch 3 C-Basiszweige und 3 R-Basiszweige dargestellt werden.

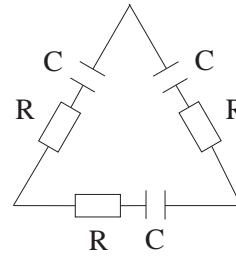


Bild 2.7: Ersatzschaltung des Kondensators

2.2.2 Filter

Das Bild 2.8 zeigt die einpolige Ersatzschaltung des Filters. Das dreipolige Filter kann durch 3 C-Basiszweige und 3 R-L-Basiszweige dargestellt werden.

2.2.3 Leitungen und Kabel

Das Bild 2.9 zeigt die einpolige Ersatzschaltung für Leitungen, Kabel, Drosseln und R-L-Belastungen. Dreipolige Anlagen können durch 3 R-L-Basiszweige dargestellt werden. Sie enthalten keine Urspannungen, d.h., $e_L = 0$.

2.2.4 Netzeinspeisung

Die Ersatzschaltung der Netzeinspeisung entspricht der Darstellung in Bild 2.4. Die Ersatzdarstellung erfolgt durch drei R-L-e-Basiszweige.

2.2.5 Transformator

Bild 2.10 zeigt die Ersatzschaltung für einen Transformator in Dy5-Schaltung. Diese Ersatzschaltung wird durch die Differentialgleichung 2.5 beschrieben.

$$\begin{bmatrix} L_1 & -M_{12} & -M_{13} & M_{14} & -M_{15} & -M_{16} \\ -M_{21} & L_2 & -M_{23} & -M_{24} & M_{25} & -M_{26} \\ -M_{31} & -M_{32} & L_3 & -M_{34} & -M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & -M_{42} & -M_{43} & L_4 & -M_{45} & -M_{46} \\ -M_{51} & M_{52} & -M_{53} & -M_{54} & L_5 & -M_{56} \\ -M_{61} & -M_{62} & M_{63} & -M_{64} & -M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{i}_4 \\ \dot{i}_5 \\ \dot{i}_6 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_1 & & & & & \\ & R_2 & & & & \\ & & R_3 & & & \\ & & & R_4 & & \\ & & & & R_5 & \\ & & & & & R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ -u_4 \\ -u_5 \\ -u_6 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

mit

L_i Selbstinduktivität von Zweig i

M_{ij} Gegeninduktivität zwischen Zweig i und j

i_{Li} Strom von Zweig i

R_i Widerstand von Zweig i

u_i Klemmenspannung von Zweig i

Der in Bild 2.10 gezeigte Transformator kann durch sechs R-L-M-Basiszweige dargestellt werden.

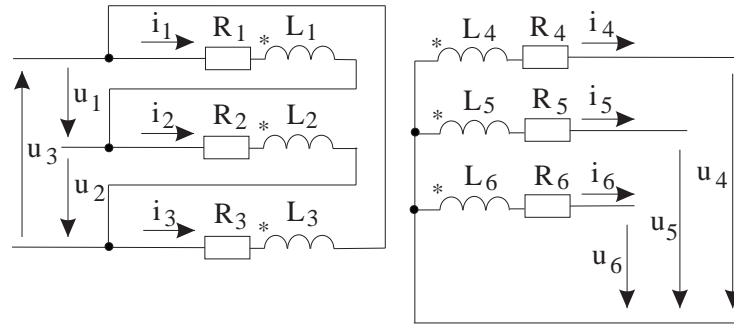


Bild 2.10: Ersatzschaltung des Transformators

2.2.6 Synchronmaschine

In dem Fall, in dem die Synchronmaschine eine subtransiente symmetrische elektrische Maschine ist, sind die subtransienten Längs- und Querinduktivitäten gleich ($L_d'' = L_q''$). Im Kurzzeitbereich (einige 100 ms) sind die Änderungen der Drehzahl noch vernachlässigbar. Die Zustandsgleichungen der Synchronmaschine sind [43]:

$$\mathbf{L}_{ss}'' \dot{\mathbf{i}}_s + \mathbf{R}_{ss} \mathbf{i}_s + \mathbf{u}_s'' = \mathbf{u}_s \quad (2.6)$$

$$\mathbf{u}_s'' = \dot{\mathbf{K}}_{sL} \Psi_L + \mathbf{K}_{sL} \dot{\Psi}_L \quad (2.7)$$

$$\dot{\Psi}_L + \mathbf{R}_L \mathbf{L}_{LL}^{-1} \Psi_L - \mathbf{R}_L \mathbf{K}_{Ls} \mathbf{i}_s = \mathbf{u}_L \quad (2.8)$$

mit

$$\mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \text{ Ständerströme}$$

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \text{ Ständerspannungen}$$

$$\Psi_L = \begin{bmatrix} \Psi_F \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \text{ Läuferflußverkettungen}$$

$$\mathbf{u}_L = \begin{bmatrix} u_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Läuferspannungen}$$

$$\mathbf{L}_{ss}'' = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} L_0 + 2L'' & L_0 - L'' & L_0 - L'' \\ L_0 - L'' & L_0 + 2L'' & L_0 - L'' \\ L_0 - L'' & L_0 - L'' & L_0 + 2L'' \end{bmatrix}$$

$$L'' = L_d''$$

$$\mathbf{R}_{ss} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{sL} = \begin{bmatrix} k_F \cos \vartheta_a & k_D \cos \vartheta_a & -k_Q \sin \vartheta_a \\ k_F \cos \vartheta_b & k_D \cos \vartheta_b & -k_Q \sin \vartheta_b \\ k_F \cos \vartheta_c & k_D \cos \vartheta_c & -k_Q \sin \vartheta_c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_L \mathbf{L}_{LL}^{-1} = \frac{1}{L_{FF} L_{DD} - L_{FD} L_{DF}} \begin{bmatrix} R_F L_{DD} & -R_F L_{FD} & 0 \\ -R_D L_{DF} & R_D L_{FF} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_Q}{L_{QQ}} (L_{FF} L_{DD} - L_{FD} L_{DF}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_L \mathbf{K}_{Ls} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} R_F k_F \cos \vartheta_a & R_F k_F \cos \vartheta_b & R_F k_F \cos \vartheta_c \\ R_D k_D \cos \vartheta_a & R_D k_D \cos \vartheta_b & R_D k_D \cos \vartheta_c \\ -R_Q k_Q \sin \vartheta_a & -R_Q k_Q \sin \vartheta_b & -R_Q k_Q \sin \vartheta_c \end{bmatrix}$$

Siehe [43] für die Beschreibung mit anderen Formelzeichen.

Die Synchronmaschine kann durch drei R-L-M-e-Basiszweige dargestellt werden. D.h. Gleichung 2.6 kann durch 3 R-L-M-e-Basiszweige dargestellt werden. Die Spannung \mathbf{u}_s'' in Gleichung 2.6 erhält man aus den Gleichungen 2.7 und 2.8.

2.2.7 Asynchronmaschine

Nach [43] kann man eine Drehstromasynchronmaschine durch Gleichungen 2.6, 2.7 und 2.8 beschreiben :

mit

$$\begin{aligned}
 \mathbf{i}_s &= \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \text{ Ständerströme} \\
 \mathbf{u}_s &= \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \text{ Ständerspannungen} \\
 \mathbf{\Psi}_L &= \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \text{ Läuferflußverkettungen} \\
 \mathbf{u}_L &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Läuferspannungen} \\
 \mathbf{L}_{ss}'' &= \frac{L_1 - M}{L_1 + \frac{M}{2}} \begin{bmatrix} L_1 + \frac{3M}{2} & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & L_1 + \frac{3M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & L_1 + \frac{3M}{2} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_{ss} &= \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_{sL} &= \frac{1}{L_1 + \frac{M}{2}} \begin{bmatrix} M \cos \vartheta & M \cos(\vartheta + 120) & M \cos(\vartheta + 240) \\ M \cos(\vartheta + 240) & M \cos \vartheta & M \cos(\vartheta + 120) \\ M \cos(\vartheta + 120) & M \cos(\vartheta + 240) & M \cos \vartheta \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_L &= \begin{bmatrix} R_2 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{L}_{LL} &= \begin{bmatrix} L_2 & -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & L_2 & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & L_2 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{K}_{Ls} &= \mathbf{K}_{sL}^T
 \end{aligned}$$

mit

R_1 Widerstand der Ständerwicklung

R_2 Widerstand der Läuferwicklung

L_1 Induktivität der Ständerwicklung

L_2 Induktivität der Läuferwicklung

M Gegeninduktivität

\mathbf{L}_{ss}'' und \mathbf{R}_{ss} sind konstant. Dies führt zu kleinen Rechenzeiten bei der Lösung der Zu-

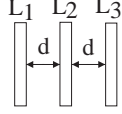


Bild 2.11: Senkrechte Anordnung der Sammelschienen

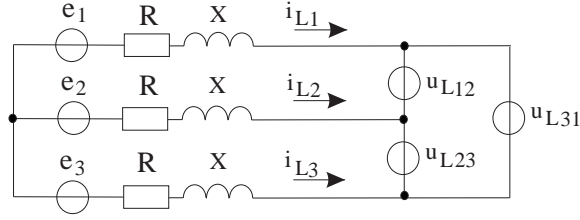


Bild 2.12: Ersatzschaltung des dreipoligen Lichtbogenkurzschlusses

standsgleichung.

2.2.8 Störlichtbogen

Ein Schaltlichtbogen kann durch ein System von Gleichungen mathematisch beschrieben werden [45, 46, 47]. Allerdings enthalten diese einige Koeffizienten, deren Bestimmung kompliziert ist, da sie eine Funktion des Materials, der Temperatur und des Drucks sind und somit die Lösung des Gleichungssystems erschweren.

Die Störlichtbogenspannung ist eine wichtige Kenngröße. Wenn diese bekannt ist, kann der Störlichtbogenstrom berechnet werden. Die Spannung von Niederspannungslichtbögen ändert sich stochastisch, was eine exakte Berechnung unmöglich macht. In [13, 14, 15] wird vorgeschlagen, Störlichtbögen in Niederspannungsnetzen als nichtlineare und zeitvariante Netzelemente in Form einer Ersatzlichtbogenspannung in den Ersatzstromkreis einzufügen, um den Lichtbogenstrom zu berechnen. Innerhalb der einzelnen Brennintervalle wird diese Spannung durch jeweils konstante Spannungswerte U_B beschrieben. Diese konstanten Spannungswerte werden auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmt und zwar mittels der Gleichung 2.9. Eine Lichtbogenspannung kann durch einen Spannungsquellen-Basiszweig simuliert werden.

$$U_B = \begin{cases} 80,1[\text{V}] + 0,027[\text{V}^{0,16}/\text{mm}]U_{Nn}^{0,84}d & \text{für } d \leq 60\text{mm} \\ 3,532[\text{V}^{0,26}]U_{Nn}^{0,74} + 0,495[\text{V}/\text{mm}]d & \text{für } d > 60\text{mm} \end{cases} \quad (2.9)$$

mit

U_{Nn} Netznennspannung 400 oder 690 V

d Abstand der Elektroden, zwischen denen der Lichtbogen auftritt

Bild 2.11 zeigt die senkrechte Anordnung der Sammelschienen. Im Bild 2.12 ist die Ersatzschaltung des dreipoligen Lichtbogenkurzschlusses für diese Anordnung der Sammelschienen dargestellt. Die Lichtbogenspannungen werden durch die Gleichungen 2.10 bis 2.12 beschrieben.

$$u_{L12} = \begin{cases} U_B \text{sign}(i_{L1}) & \text{für } i_{L1} \cdot i_{L2} < 0 \\ 0 & \text{für } i_{L1} \cdot i_{L2} \geq 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$u_{L23} = \begin{cases} U_B \text{sign}(i_{L2}) & \text{für } i_{L2} \cdot i_{L3} < 0 \\ 0 & \text{für } i_{L2} \cdot i_{L3} \geq 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$u_{L31} = \begin{cases} U_B \text{sign}(i_{L3}) & \text{für } i_{L3} \cdot i_{L1} < 0 \\ 0 & \text{für } i_{L3} \cdot i_{L1} \geq 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

mit

$u_{L12}, u_{L23}, u_{L31}$ Lichtbogenspannungen

i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} Leiterströme

Die Gleichungen 2.10, 2.11 und 2.12 beschreiben nicht nur die Lichtbogenspannungen, sondern auch die Beziehungen zwischen Lichtbogenspannungen und Leiterströme.

Die Lichtbogenspannungen des dreipoligen Lichtbogenkurzschlusses können durch drei Spannungsquellen-Basiszweige simuliert werden. Die Bilder 4.6 und 4.7 zeigen Verläufe der Lichtbogenspannungen und der Leiterströme des dreipoligen Lichtbogenkurzschlusses für die senkrechte Anordnung der Sammelschienen.

Kapitel 3

Zustandsgleichung des Systems

Die Betriebsmittel werden durch die Basiszweige beschrieben. Die Ersatzschaltung des Systems enthält die Basiszweige und Knoten. Die Struktur des Systems kann durch den Netzgraph beschrieben werden. Der Zweig im Netzgraph erhält einen Orientierungspfeil. Die Pfeilrichtung des Zweigs ist gleich der Bezugsrichtung des Stroms im Basiszweig. Der Netzgraph ist deshalb ein Orientierungsgraph [21, 43].

Ein Baum des Netzgraphs enthält keine Masche. Ein vollständiger Baum erfasst alle Knoten des Netzgraphs. Wenn der Netzgraph b Basiszweige und n Knoten hat, hat ein vollständiger Baum $n-1$ Baumzweige, und der Netzgraph hat dann $b-(n-1)$ Verbindungszweige. Der Normalbaum erfasst in einem R, L, C-Netz die maximale Anzahl von kapazitiven Zweigen und die minimale Anzahl von induktiven Zweigen.

Nachdem der Normalbaum bestimmt worden ist, lässt sich die Inzidenzmatrix ableiten. Die Inzidenzmatrix kann einen vollständig Graph beschreiben. Die Inzidenzmatrix hat $n-1$ Zeilen und b Spalten. Ihre Elemente sind $+1$, -1 oder 0 . Nach der Bestimmung der Struktur des Systems und dem Normalbaum können die Elemente der Inzidenzmatrix ermittelt werden. Man bearbeitet erst die Baumzweige und dann Verbindungszweige.

Die ersten $n-1$ Spalten der Schnittmatrix bilden eine Einheitsmatrix. Man kann die Inzidenzmatrix bearbeiten, um die Schnittmatrix abzuleiten. D. h. man transformiert die Inzidenzmatrix, damit die ersten $n-1$ Spalten der Inzidenzmatrix eine Einheitsmatrix werden.

Aus der Schnittmatrix und den Differentialgleichungen der Betriebsmittel kann man die Zustandsgleichungen des Systems ableiten. In diesem Kapitel wird der Algorithmus zur Formulierung der Zustandsgleichungen des Systems beschrieben.

3.1 Algorithmus zur Formulierung des Normalbaums

Im Folgenden wird ein System untersucht, das aus den Elementen Spannungsquellen-Basiszweig, C-Basiszweig, R-Basiszweig, R-L-M-e-Basiszweig, und Stromquellen-Basiszweig besteht. Dieses System kann durch einen Netzgraph beschrieben werden. Der Algo-

rithmus zur Formulierung des Normalbaums wird in drei Schritte aufgeteilt [21].

1. Benennung der Basiszweige und Knoten des Netzes.

2. Ordnung der Basiszweige der Reihenfolge nach, damit der Normalbaum alle Spannungsquellen-Basiszweige, die maximale Anzahl von kapazitiven Zweigen, die minimale Anzahl von induktiven Zweigen und keinen Stromquellen-Basiszweig erfasst.

- (1) Spannungsquellen-Basiszweige
- (2) C-Basiszweige.
- (3) R-Basiszweige.
- (4) R-L-M-e-Basiszweige.
- (5) Stromquellen-Basiszweige.

3. Auswahl eines Zweigs e_{pq} der o.g. Reihenfolge nach. e_{pq} bedeutet einen Zweig e zwischen Knoten p und q . Hinsichtlich der Bearbeitung des Zweigs gibt es vier Möglichkeiten.

- (1) Wenn die vorhandene Zweigmengen keine Knoten p und q enthalten, wird eine neue Zweigmenge erstellt und die Knoten p und q sind Elemente der neuen Zweigmenge. Der Zweig ist Baumzweig.
- (2) Wenn zwei Knoten p und q in einer vorhandene Zweigmenge liegen, ist der Zweig keinen Baumzweig und der Zweig wird vernachlässigt.
- (3) Wenn ein Knoten p oder q in einer Zweigmenge S_i liegt, und ein anderer Knoten nicht in der vorhandene Zweigmengen liegt, wird der andere Knoten in die Zweigmenge S_i aufgenommen. Der Zweig ist Baumzweig.
- (4) Wenn ein Knoten p oder q in einer Zweigmenge S_i liegt und ein anderer Knoten in einer Zweigmenge S_j liegt, werden alle Knoten in der Zweigmenge S_j in die Zweigmenge S_i aufgenommen und die Zweigmenge S_j wird gelöscht. Der Zweig ist Baumzweig.

Der Schritt 3 wird wiederholt bis alle n Knoten in einer Zweigmenge liegen. Die Zweige in der Zweigmenge sind $n-1$ Baumzweige und bilden einen Normalbaum.

Bild 3.1 zeigt die Ersatzschaltung eines Beispielnetzes. Diese wird benutzt, um die Formulierung des Normalbaums zu erklären.

Die Ersatzschaltung hat 15 Basiszweige und 10 Knoten. Sie werden als Basiszweige Z1 bis Z15 und Knoten K1 bis K10 benannt.

Die Ersatzschaltung hat nur C-Basiszweige, R-Basiszweige und R-L-M-e-Basiszweige. Ihre Reihenfolge sollen Z8, Z10, Z12, Z7, Z9, Z11, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z13, Z14 und Z15 sein.

Bestimmung der Baumzweige nach o. g. Ordnung:

Der Zweig Z8 wird ausgewählt. Eine Zweigmenge S1 wird erstellt. Knoten K5 und K6 des Zweiges Z8 werden in die Zweigmenge S1 aufgenommen. Z8 ist ein Baumzweig.

Der Zweig Z10 wird ausgewählt. Knoten K7 und K8 des Zweiges Z10 sind keine Ele-

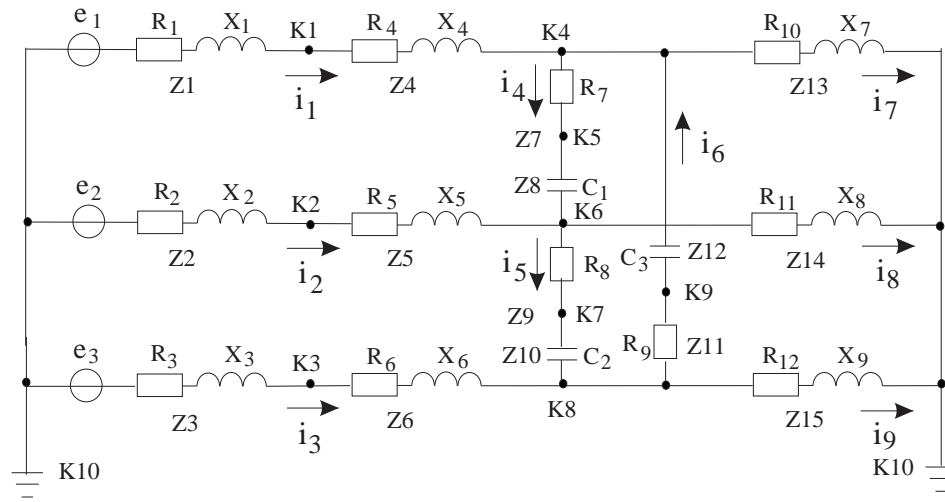


Bild 3.1: Ersatzschaltung des Beispielnetzes

mente der Zweigmengende S1. Zweigmengende S2 wird deshalb erstellt. Knoten K7 und K8 werden in die Zweigmengende S2 aufgenommen. Z10 ist Baumzweig.

Der Zweig Z12 wird ausgewählt. Knoten K4 und K9 des Zweiges Z12 sind keine Elemente der Zweigmengende S1 oder der Zweigmengende S2. Zweigmengende S3 wird erstellt. Knoten K4 und K9 werden in die Zweigmengende S3 aufgenommen. Z12 ist Baumzweig.

Der Zweig Z7 wird ausgewählt. Knoten K4 des Zweiges Z7 ist Element der Zweigmengende S3 und Knoten K5 ist Element der Zweigmengende S1. Die Elemente der Zweigmengende S3 werden in die Zweigmengende S1 aufgenommen. Die Zweigmengende S3 wird gelöscht. Z7 ist Baumzweig.

Der Zweig Z9 wird ausgewählt. Knoten K6 des Zweiges Z9 ist Element der Zweigmengende S1 und K7 ist Element der Zweigmengende S2. Die Elemente der Zweigmengende S2 werden in die Zweigmengende S1 aufgenommen. Die Zweigmengende S2 wird gelöscht. Z9 ist Baumzweig.

Der Zweig Z11 wird ausgewählt. Knoten K8 und K9 des Zweiges Z11 sind Elemente der Zweigmengende S1. Z11 ist kein Baumzweig.

Der Zweig Z1 wird ausgewählt. Knoten K1 und K10 des Zweiges Z1 sind keine Elemente der Zweigmengende S1. Zweigmengende S4 wird erstellt. Knoten K1 und K10 werden in die Zweigmengende S4 aufgenommen. Z1 ist Baumzweig.

Der Zweig Z2 wird ausgewählt. Knoten K10 ist Element der Zweigmengende S4. K2 liegt nicht in der vorhandene Zweigmengende. K2 wird in die Zweigmengende S4 aufgenommen. Z2 ist Baumzweig.

Nach dem Vorgang bearbeitet man Restzweige und bekommt 9 Baumzweige: Z8, Z10, Z12, Z7, Z9, Z1, Z2, Z3 und Z4. Ein Baum besteht aus den 9 Baumzweige. Der Baum verbindet 10 Knoten und hat keine Masche. Andere Basiszweige sind Verbindungszweige.

3.2 Algorithmus zur Formulierung der Inzidenzmatrix

Nachdem die Baumzweige aufgestellt worden sind, kann man die Inzidenzmatrix formulieren. Der Algorithmus wird in zwei Schritte aufgeteilt.

1. Ordnung aller Basiszweige

Alle b Basiszweige werden in Baumzweige und Verbindungszweige aufgeteilt. Alle Baumzweige werden vor allen Verbindungszweigen positioniert.

Die Baumzweige werden in nachstehender Reihenfolge angeordnet :

- (1) Spannungsquellen-Basiszweige.
- (2) C-Basiszweige.
- (3) R-Basiszweige.
- (4) R-L-M-e-Basiszweige.

Die Verbindungszweige werden folgendermaßen angeordnet :

- (1) C-Basiszweige.
- (2) R-Basiszweige.
- (3) R-L-M-e-Basiszweige.
- (4) Stromquellen-Basiszweige.

2. Bildung der Inzidenzmatrix:

Die Pfeilrichtung des Zweigs ist gleich der Bezugsrichtung des Stroms im Basiszweig. Die Elemente der Inzidenzmatrix sind +1, -1 oder 0. Die Pfeilrichtung des Zweigs bestimmt den Wert des Elements. Die Inzidenzmatrix hat $n-1$ Zeilen und b Spalten. Der Bezugsknoten wird nicht berücksichtigt. Bestimmung aller Zweige nach oben erwähnten Ordnung:

- (1) Wenn der Zweig j auf den Knoten i gerichtet ist, hat das Element der Inzidenzmatrix i_{ij} den Wert +1.
- (2) Wenn der Zweig j gegen den Knoten i gerichtet ist, hat das Element der Inzidenzmatrix i_{ij} den Wert -1.
- (3) Wenn der Zweig j mit dem Knoten i nicht verbunden ist, hat das Element der Inzidenzmatrix i_{ij} den Wert 0.

Die Inzidenzmatrix \mathbf{I} besitzt folgende Form :

$$\mathbf{I} = [\mathbf{I}^B \ \mathbf{I}^V] \quad (3.1)$$

Die $n-1$ Baumzweige besetzen die ersten $n-1$ Spalten und die $b-(n-1)$ Verbindungszweige besetzen die anderen $b-(n-1)$ Spalten der Matrix.

3.3 Algorithmus zur Formulierung der Schnittmatrix

Die ersten $n-1$ Spalten der Schnittmatrix bilden eine Einheitsmatrix. Das Ziel der Transformation ist die Bildung der Einheitsmatrix. Zunächst erfolgt die Bearbeitung von Spalte 1 bis $n-1$ der Inzidenzmatrix:

(1) Bearbeitung des Element i_{ij} der Spalte j , das noch nicht bestimmt worden ist und die wenigste Anzahl von Element hat, die ungleich Null sind.

(1.1) Wenn das Element i_{ij} -1 ist, werden alle Elemente der Zeile i mit -1 multipliziert.

(1.2) Wenn das Element i_{ij} kein Diagonalelement ist, d.h. $i \neq j$, wird die Zeile i mit einer anderen Zeile j vertauscht, damit das Element ein Diagonalelement wird.

(2) Bearbeitung alle Elemente i_{ij} der Spalte j , das nicht 0 ist und $i \neq j$

(2.1) Wenn das Element -1 ist, wird zur Zeile i die Zeile j addiert.

(2.2) Wenn das Element +1 ist, wird die Zeile i mit -1 multipliziert und die Zeile i zur Zeile j addiert .

Durch die Bearbeitung der $n-1$ Spalten von Inzidenzmatrix erhält man die Schnittmatrix \mathbf{S} in folgender Form

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \ \mathbf{S}^v] \quad (3.2)$$

mit

\mathbf{E} Einheitsmatrix

Zugleich erhält man die Maschenmatrix \mathbf{M} .

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}^B \ \mathbf{E}] \quad (3.3)$$

mit

$$\mathbf{M}^B = -[\mathbf{S}^v]^T$$

Die \mathbf{M}^B und \mathbf{S}^v werden zur Formulierung der Zustandsgleichung benutzt.

3.4 Formulierung der Zustandsgleichung

Der 1. Kirchhoffsche Satz sagt aus, dass die algebraische Summe aller Ströme, die durch eine Schnittmenge fließen gleich Null ist. Der Knotensatz kann durch die folgende Gleichung formuliert werden:

$$\mathbf{S} \ \mathbf{i} = \mathbf{0} \quad (3.4)$$

mit

\mathbf{i} Zweigströme

Die Zweigströme werden nach Baum- und Verbindungszweigströmen geordnet.

$$\mathbf{i} = [\mathbf{i}^B \ \mathbf{i}^v]^T \quad (3.5)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen Gl. 3.2 und 3.5 in Gleichung 3.4 ergibt sich

$$\mathbf{i}^B = -\mathbf{S}^V \mathbf{i}^V \quad (3.6)$$

mit

\mathbf{i}^B Baumzweigströme

\mathbf{i}^V Verbindungszweigströme

Gleichung 3.6 kann ausführlich formuliert werden :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_E^B \\ \mathbf{i}_C^B \\ \mathbf{i}_R^B \\ \mathbf{i}_L^B \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{EC} & \mathbf{S}_{ER} & \mathbf{S}_{EL} & \mathbf{S}_{EJ} \\ \mathbf{S}_{CC} & \mathbf{S}_{CR} & \mathbf{S}_{CL} & \mathbf{S}_{CJ} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{RR} & \mathbf{S}_{RL} & \mathbf{S}_{RJ} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_{LL} & \mathbf{S}_{LJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_C^V \\ \mathbf{i}_R^V \\ \mathbf{i}_L^V \\ \mathbf{i}_J^V \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

mit

\mathbf{i}_E^B Ströme der Spannungsquellen-Baumzweige

\mathbf{i}_C^B Ströme der C-Baumzweige

\mathbf{i}_R^B Ströme der R-Baumzweige

\mathbf{i}_L^B Ströme der R-L-M-e-Baumzweige

\mathbf{i}_C^V Ströme der C-Verbindungszweige

\mathbf{i}_R^V Ströme der R-Verbindungszweige

\mathbf{i}_L^V Ströme der R-L-M-e-Verbindungszweige

\mathbf{i}_J^V Ströme der Stromquelle-Verbindungszweige

Der Maschensatz kann durch die folgenden Gleichungen formuliert werden :

$$\mathbf{M} \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

mit

\mathbf{u} Zweigspannungen

Die Zweigspannungen werden nach Baum- und Verbindungszweigspannungen geordnet:

$$\mathbf{u} = [\mathbf{u}^B \ \mathbf{u}^V]^T \quad (3.9)$$

Setzt man die Gleichungen 3.3 und 3.9 in Gleichung 3.8 ein, so erhält man :

$$\mathbf{u}^V = -\mathbf{M}^B \mathbf{u}^B \quad (3.10)$$

mit

\mathbf{u}^V Verbindungszweigspannungen

\mathbf{u}^B Baumzweigspannungen

Gleichung 3.10 kann ausführlich formuliert werden :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_C^V \\ \mathbf{u}_R^V \\ \mathbf{u}_L^V \\ \mathbf{u}_J^V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{CE} & \mathbf{M}_{CC} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{RE} & \mathbf{M}_{RC} & \mathbf{M}_{RR} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{LE} & \mathbf{M}_{LC} & \mathbf{M}_{LR} & \mathbf{M}_{LL} \\ \mathbf{M}_{JE} & \mathbf{M}_{JC} & \mathbf{M}_{JR} & \mathbf{M}_{JL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_E^B \\ \mathbf{u}_C^B \\ \mathbf{u}_R^B \\ \mathbf{u}_L^B \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

mit

- \mathbf{u}_C^V Spannungen der C-Verbindungszweige
- \mathbf{u}_R^V Spannungen der R-Verbindungszweige
- \mathbf{u}_L^V Spannungen der R-L-M-e-Verbindungszweige
- \mathbf{u}_J^V Spannungen der Stromquellen-Verbindungszweige
- \mathbf{u}_E^B Spannungen der Spannungsquellen-Baumzweige
- \mathbf{u}_C^B Spannungen der C-Baumzweige
- \mathbf{u}_R^B Spannungen der R-Baumzweige
- \mathbf{u}_L^B Spannungen der R-L-M-e-Baumzweige

Die C-Basiszweige können durch die folgenden Differentialgleichungen beschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}^B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_C^B \\ \dot{\mathbf{u}}_C^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_C^B \\ \mathbf{i}_C^V \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Die R-Basiszweige lassen sich durch die folgende Beziehung beschreiben :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_R^B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_R^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_R^B \\ \dot{\mathbf{u}}_R^V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_R^B \\ \mathbf{u}_R^V \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Die R-L-M-e-Basiszweige können durch die folgenden Differentialgleichungen beschrieben werden :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L}^B & \mathbf{L}^{BV} \\ \mathbf{L}^{VB} & \mathbf{L}^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_L^B \\ \dot{\mathbf{u}}_L^V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_L^B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_L^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_L^B \\ \mathbf{u}_L^V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_L^B \\ \mathbf{u}_L^V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_L^B \\ \mathbf{e}_L^V \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Die C-Baumzweigspannungen und die R-L-M-e-Verbindungszweigströme sind die Zustandsvariablen. Aus den Gl. 3.7, Gl. 3.11, Gl. 3.12, Gl. 3.13, und Gl. 3.14 erhält man die Zustandsgleichung des Systems.

Man bekommt die folgenden Gleichungen aus Zeile 3 der Gl. 3.11.

$$\mathbf{M}_{LL} \mathbf{u}_L^B + \mathbf{u}_L^V = -\mathbf{M}_{LE} \mathbf{u}_E^B - \mathbf{M}_{LC} \mathbf{u}_C^B - \mathbf{M}_{LR} \mathbf{u}_R^B \quad (3.15)$$

Gl. 3.15 kann durch Matrix formuliert werden.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_L^B \\ \mathbf{u}_L^V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LE} & \mathbf{M}_{LC} & \mathbf{M}_{LR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_E^B \\ \mathbf{u}_C^B \\ \mathbf{u}_R^B \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Gl. 3.14 multipliziert $\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{E} \end{bmatrix}$, erhält man

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{L}^B & \mathbf{L}^{BV} \\ \mathbf{L}^{VB} & \mathbf{L}^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_L^B \\ \dot{\mathbf{u}}_L^V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_L^B & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_L^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_L^B \\ \mathbf{u}_L^V \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LE} & \mathbf{M}_{LC} & \mathbf{M}_{LR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_E^B \\ \mathbf{u}_C^B \\ \mathbf{u}_R^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_L^B \\ \mathbf{e}_L^V \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Die folgenden Gleichungen resultieren aus Zeile 4 der Gl. 3.7.

$$\mathbf{i}_L^B = -\mathbf{S}_{LL}\mathbf{i}_L^V - \mathbf{S}_{LJ}\mathbf{i}_J^V \quad (3.18)$$

Die Ableitung der Gl. 3.18 ist

$$\dot{\mathbf{i}}_L^B = -\mathbf{S}_{LL}\dot{\mathbf{i}}_L^V - \mathbf{S}_{LJ}\dot{\mathbf{i}}_J^V \quad (3.19)$$

Man setzt Gl. 3.19 in Gl. 3.17 ein, so ergibt sich

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M}_{LL}\mathbf{L}^{BV} + \mathbf{L}^V - \mathbf{M}_{LL}\mathbf{L}^B\mathbf{S}_{LL} - \mathbf{L}^{VB}\mathbf{S}_{LL})\dot{\mathbf{i}}_L^V - (\mathbf{M}_{LL}\mathbf{L}^B + \mathbf{L}^{VB})\mathbf{S}_{LJ}\dot{\mathbf{i}}_J^V = \\ & \left(\mathbf{M}_{LL}\mathbf{R}_L^B\mathbf{S}_{LL} - \mathbf{R}_L^V \right)\mathbf{i}_L^V + \mathbf{M}_{LL}\mathbf{R}_L^B\mathbf{S}_{LJ}\mathbf{i}_J^V - \mathbf{M}_{LE}\mathbf{u}_E^B - \mathbf{M}_{LC}\mathbf{u}_C^B - \mathbf{M}_{LR}\mathbf{u}_R^B + \mathbf{M}_{LL}\mathbf{e}_L^B + \mathbf{e}_L^V \end{aligned} \quad (3.20)$$

Man erhält die folgenden Gleichungen aus Zeile 2 der Gl. 3.7.

$$\mathbf{i}_C^B + \mathbf{S}_{CC}\mathbf{i}_C^V = -\mathbf{S}_{CR}\mathbf{i}_R^V - \mathbf{S}_{CL}\mathbf{i}_L^V - \mathbf{S}_{CJ}\mathbf{i}_J^V \quad (3.21)$$

Gl. 3.21 kann durch Matrix formuliert werden:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{S}_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_C^B \\ \mathbf{i}_C^V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{CR} & \mathbf{S}_{CL} & \mathbf{S}_{CJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_R^V \\ \mathbf{i}_L^V \\ \mathbf{i}_J^V \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Gl. 3.12 multipliziert $\begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{S}_{CC} \end{bmatrix}$, so ergibt sich

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}^B & \mathbf{S}_{CC}\mathbf{C}^V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_C^B \\ \dot{\mathbf{i}}_C^V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{CR} & \mathbf{S}_{CL} & \mathbf{S}_{CJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_R^V \\ \mathbf{i}_L^V \\ \mathbf{i}_J^V \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Die folgenden Gleichungen resultieren aus Zeile 1 der Gl. 3.11.

$$\mathbf{u}_C^V = -\mathbf{M}_{CE}\mathbf{u}_E^B - \mathbf{M}_{CC}\mathbf{u}_C^B \quad (3.24)$$

Die Ableitung der Gl. 3.24 ist

$$\dot{\mathbf{u}}_C^V = -\mathbf{M}_{CE}\dot{\mathbf{u}}_E^B - \mathbf{M}_{CC}\dot{\mathbf{u}}_C^B \quad (3.25)$$

Gl. 3.25 wird in die Gl. 3.23 eingesetzt, und es ergibt sich

$$(\mathbf{C}^B - \mathbf{S}_{CC}\mathbf{C}^V\mathbf{M}_{CC})\dot{\mathbf{u}}_C^B - \mathbf{S}_{CC}\mathbf{C}^V\mathbf{M}_{CE}\dot{\mathbf{u}}_E^B = -\mathbf{S}_{CR}\mathbf{i}_R^V - \mathbf{S}_{CL}\mathbf{i}_L^V - \mathbf{S}_{CJ}\mathbf{i}_J^V \quad (3.26)$$

Man erhält die folgenden Gleichungen aus Zeile 3 der Gl. 3.7, Zeile 2 der Gl. 3.11 und Gl. 3.13.

$$\mathbf{u}_R^B = \mathbf{G}_B^{-1} \left(\mathbf{S}_{RR}(\mathbf{R}_R^V)^{-1}\mathbf{M}_{RE}\mathbf{u}_E^B + \mathbf{S}_{RR}(\mathbf{R}_R^V)^{-1}\mathbf{M}_{RC}\mathbf{u}_C^B - \mathbf{S}_{RL}\mathbf{i}_L^V - \mathbf{S}_{RJ}\mathbf{i}_J^V \right) \quad (3.27)$$

$$\mathbf{i}_R^V = \mathbf{R}_V^{-1}(-\mathbf{M}_{RE}\mathbf{u}_E^B - \mathbf{M}_{RC}\mathbf{u}_C^B + \mathbf{M}_{RR}\mathbf{R}_R^B\mathbf{S}_{RL}\mathbf{i}_L^V + \mathbf{M}_{RR}\mathbf{R}_R^B\mathbf{S}_{RJ}\mathbf{i}_J^V) \quad (3.28)$$

mit

$$\begin{aligned}\mathbf{G}_B &= (\mathbf{R}_R^B)^{-1} - \mathbf{S}_{RR} (\mathbf{R}_R^V)^{-1} \mathbf{M}_{RR} \\ \mathbf{R}_V &= \mathbf{R}_R^V - \mathbf{M}_{RR} \mathbf{R}_R^B \mathbf{S}_{RR}\end{aligned}$$

Man setzt Gl. 3.27 und Gl. 3.28 in Gl. 3.20 und Gl. 3.26 ein und erhält sodann die Zustandsgleichung des Systems.

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_C^B \\ \dot{\mathbf{i}}_L^V \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_3 & \mathbf{M}_4 \\ \mathbf{M}_5 & \mathbf{M}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_C^B \\ \dot{\mathbf{i}}_L^V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_7 & \mathbf{M}_8 \\ \mathbf{M}_9 & \mathbf{M}_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_E^B \\ \dot{\mathbf{i}}_J^V \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_E^B \\ \dot{\mathbf{i}}_J^V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{LL} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_L^B \\ \mathbf{e}_L^V \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.29)$$

mit

$$\begin{aligned}\mathbf{M}_1 &= \mathbf{C}^B - \mathbf{S}_{CC} \mathbf{C}^V \mathbf{M}_{CC} \\ \mathbf{M}_2 &= \mathbf{M}_{LL} \mathbf{L}^{BV} + \mathbf{L}^V - \mathbf{M}_{LL} \mathbf{L}^B \mathbf{S}_{LL} - \mathbf{L}^{VB} \mathbf{S}_{LL} \\ \mathbf{M}_3 &= \mathbf{S}_{CR} \mathbf{R}_V^{-1} \mathbf{M}_{RC} \\ \mathbf{M}_4 &= -\mathbf{S}_{CL} - \mathbf{S}_{CR} \mathbf{R}_V^{-1} \mathbf{M}_{RR} \mathbf{R}_R^B \mathbf{S}_{RL} \\ \mathbf{M}_5 &= -\mathbf{M}_{LC} - \mathbf{M}_{LR} \mathbf{G}_B^{-1} \mathbf{S}_{RR} (\mathbf{R}_R^V)^{-1} \mathbf{M}_{RC} \\ \mathbf{M}_6 &= \mathbf{M}_{LL} \mathbf{R}_L^B \mathbf{S}_{LL} - \mathbf{R}_L^V + \mathbf{M}_{LR} \mathbf{G}_B^{-1} \mathbf{S}_{RL} \\ \mathbf{M}_7 &= \mathbf{S}_{CR} \mathbf{R}_V^{-1} \mathbf{M}_{RE} \\ \mathbf{M}_8 &= -\mathbf{S}_{CJ} - \mathbf{S}_{CR} \mathbf{R}_V^{-1} \mathbf{M}_{RR} \mathbf{R}_R^B \mathbf{S}_{RJ} \\ \mathbf{M}_9 &= -\mathbf{M}_{LE} - \mathbf{M}_{LR} \mathbf{G}_B^{-1} \mathbf{S}_{RR} (\mathbf{R}_R^V)^{-1} \mathbf{M}_{RE} \\ \mathbf{M}_{10} &= \mathbf{M}_{LL} \mathbf{R}_L^B \mathbf{S}_{LJ} + \mathbf{M}_{LR} \mathbf{G}_B^{-1} \mathbf{S}_{RJ} \\ \mathbf{M}_{11} &= \mathbf{S}_{CC} \mathbf{C}^V \mathbf{M}_{CE} \\ \mathbf{M}_{12} &= \mathbf{M}_{LL} \mathbf{L}^B + \mathbf{L}^{VB}\end{aligned}$$

Man löst Gl. 3.29 und erhält die Zustandsvariablen \mathbf{u}_C^B und $\dot{\mathbf{i}}_L^V$. Die anderen Zweigspannungen und -ströme kann man aus den Gl. 3.7 bis Gl. 3.28 berechnen.

Nachdem die Baumzweigspannungen berechnet worden sind, kann man die Knotenspannungen bestimmen. Die Spannungen zwischen Knoten und Bezugsknoten sind [22]:

$$\mathbf{u}_K = -((\mathbf{I}^B)^{-1})^T \mathbf{u}^B \quad (3.30)$$

mit

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_K &\text{ Spannungen zwischen Knoten und Bezugsknoten} \\ \mathbf{u}^B &\text{ Baumzweigspannungen}\end{aligned}$$

Kapitel 4

Rechenprogramm

Das Programm LBKSTools wurde mit VC++ geschrieben. Es ist in der Lage, die Ströme sowohl bei metallischen Kurzschlüssen als auch bei Lichtbogenkurzschlüssen im Elektroenergieversorgungssystem zu berechnen. Das System besteht aus Kondensatoren, Filter, Leitungen, Kabel, Drosseln, Belastungen, Netzeinspeisungen, Transformatoren, Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen. Die Betriebsmittel werden durch die in Kapitel 2 eingeführten Basiszweige beschrieben. Das Programm benutzt den in Kapitel 3 erstellten Algorithmus, um die Zustandsgleichungen des Systems zu bilden. Diese werden mit dem Runge-Kutta Verfahren gelöst. Das Programm kann Systeme mit beliebig komplizierten Strukturen analysieren. Es enthält eine MS Access Datenbank. Als Anwender kann man die Daten des zu analysierenden Systems auf einfache Art und Weise eingeben und die Rechenergebnisse betrachten bzw. ausdrucken.

4.1 Berechnungsablauf

Bild 4.1 zeigt schematischer Berechnungsablauf.

Das Programm berechnet die Kurzschlußströme in folgenden Schritten:

- (1) Der Benutzer gibt die Bezeichnungen und Parameter der Betriebsmittel sowie Verbindungen zwischen den Betriebsmitteln ein. Das Programm speichert die Daten in die Datenbank.
- (2) Berechnung der Bezugsspannungen
- (3) Berechnung der bezogenen Größen der Parameter der Betriebsmittel
- (4) Berechnung des Leistungsflusses
- (5) Bezeichnung der Knoten und Zweige
- (6) Formulierung des Normalbaums
- (7) Formulierung der Inzidenz- und Schnittmatrix
- (8) Berechnung der Matrizen \mathbf{M}_1 bis \mathbf{M}_{12}

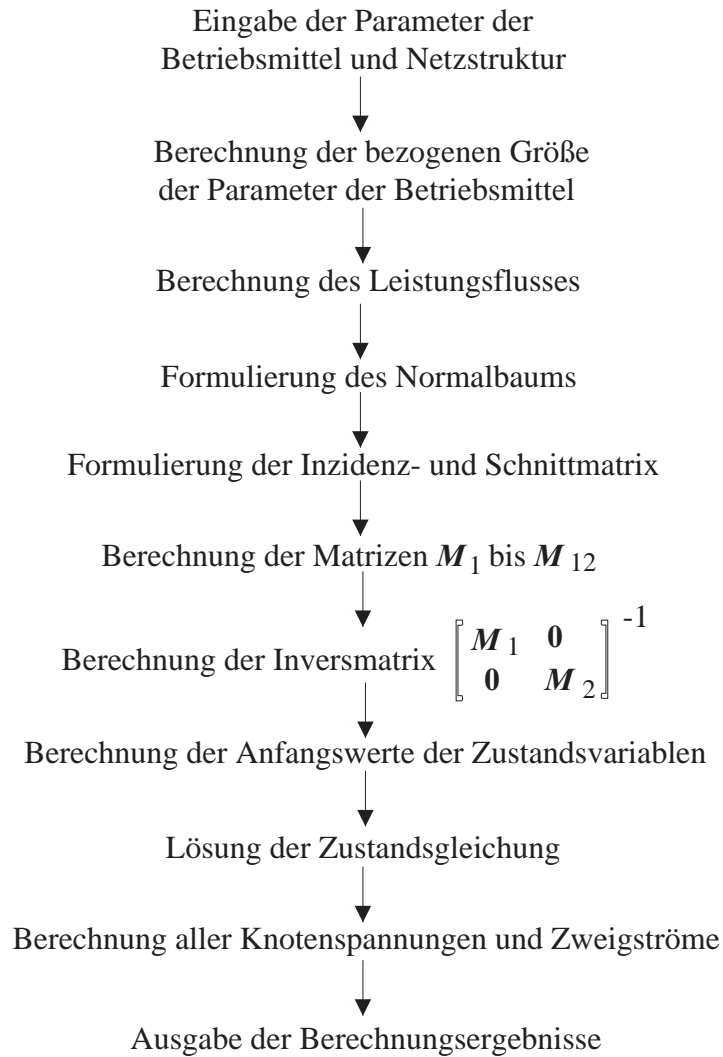


Bild 4.1: schematischer Berechnungsablauf

(9) Berechnung von $\dot{\mathbf{u}}_{\text{E}}^{\text{B}}$, $\dot{\mathbf{i}}_{\text{J}}^{\text{V}}$, $\mathbf{e}_{\text{L}}^{\text{B}}$ und $\mathbf{e}_{\text{L}}^{\text{V}}$

(10) Berechnung der Inversmatrix $\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_2 \end{bmatrix}^{-1}$
 Gl. 3.29 wird mit der Inversmatrix multipliziert

(11) Berechnung der Anfangswerte der Zustandsvariablen

(12) Lösung der Zustandsgleichung

(13) Berechnung aller Knotenspannungen und Zweigströme

(14) Grafische Darstellung der Lösungen

(15) Speichern der Berechnungsergebnisse in die Datenbank

4.2 Beispiele

Anhand dreier Beispiele soll im Folgenden ein Nachweis für die Genauigkeit des Programms erbracht werden. Im ersten Fall handelt es sich um die Berechnung der zeitlichen Verläufe der Ströme bei einem metallischen Kurzschluß, wobei das Ergebnis mit der analytischen Lösung verglichen wird. Im zweiten Fall werden die zeitlichen Verläufe der Ströme bei einem Lichtbogenkurzschluß berechnet. Die Ergebnisse werden mit denen verglichen, die durch ein Programm auf der Basis von MATLAB bestimmt wurden. In einem weiteren Beispiel wird das Elektroenergieversorgungssystem analysiert.

4.2.1 Metallischer Kurzschluß

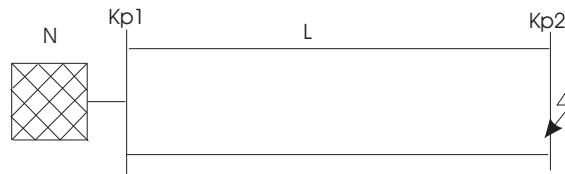


Bild 4.2: Netzschaltplan für Kurzschlußstromberechnung

Bild 4.2 zeigt den Netzschaltplan für die Berechnung dreipoliger metallischer Kurzschlußströme. Bild 4.3 zeigt die zugehörige Ersatzschaltung. Die Spannung des Netzes ist 400 V und der Spannungsfaktor ist 1,05. Die Stromkreisparameter sind $R = 20,864\text{m}\Omega$; $X = 8,637\text{m}\Omega$. Bild 4.4 zeigt die durch das Programm berechneten Ergebnisse. Der maximale Leiterstrom beträgt 15,23755 kA.

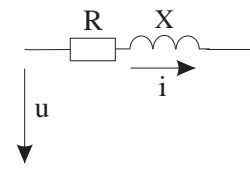


Bild 4.3: Schaltung für die Kurzschlußstromberechnung

Man kann den Strom durch das Lösen einer Differentialgleichung berechnen. Die analytische Lösung ist:

$$i_K = 1,05 \times 14,4633881 \times [\sin(314,15926t - 0,3924883) - \sin(-0,3924883)e^{-t/0,001317697}]$$

Das Bild 4.5 zeigt den Zeitverlauf eines Leiterstroms aus der analytischen Lösung. Der Scheitelwert des Stroms ist 15,237577 kA. Der Vergleich der analytischen Lösung und der durch das Programm LBKSTools ermittelten Werte ergibt einen Rechenfehler von 0,000178%.

4.2.2 Lichtbogenkurzschluß

Das im Bild 4.2 gezeigte System wird auch benutzt, um dreipolige Lichtbogenkurzschlußströme zu berechnen. Die Spannung des Netzes beträgt 380 V und der Spannungsfaktor ist

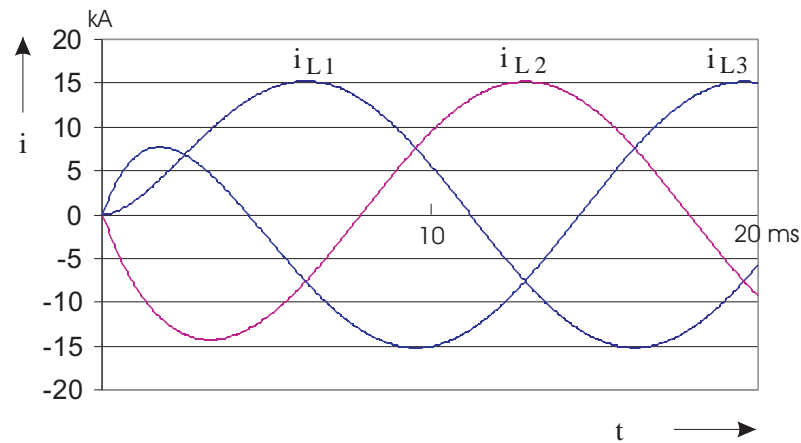


Bild 4.4: Durch das Programm LBKSTools berechnete metallische Kurzschlußströme

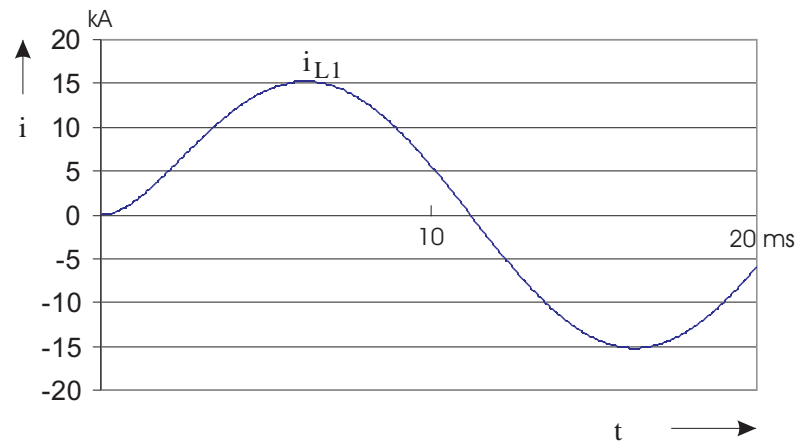


Bild 4.5: Analytische Lösung des metallischen Kurzschlußstroms

1,0. Die Stromkreisparameter sind $R = 13,34\text{m}\Omega$; und $X = 19,8\text{m}\Omega$. Der Abstand d der Punkte, zwischen denen der Lichtbogen brennt, beträgt 18 mm. Die Lichtbogen Spannung U_B beträgt 151,4928 V. Bild 4.6 zeigt die zeitlichen Verläufe der Lichtbogen Spannungen. Das Bild 4.7 zeigt die zeitlichen Verläufe der Lichtbogenkurzschlußströme, die durch das Programm LBKSTools berechnet wurden. Der Strom von Punkt A im Bild 4.7 beträgt 10,3748 kA.

Das Bild 4.8 zeigt die Lichtbogenkurzschlußströme, die mit Hilfe des Programms MATLAB berechnet wurden. Der Strom von Punkt B im Bild 4.8 beträgt 10,33 kA. Der Vergleich der beiden Ergebnisse liefert einen Rechenfehler von 0,4318%.

Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass der Unterschied zwischen beiden Ergebnissen relativ gering und vernachlässigbar ist. Wichtiger ist die Feststellung, dass sich die Berechnung der Lichtbogenkurzschlußströme für beliebig komplizierte Netzstrukturen mit dem Programm LBKSTools wesentlich einfacher gestaltet als mit einem Programm auf der Basis von MATLAB.

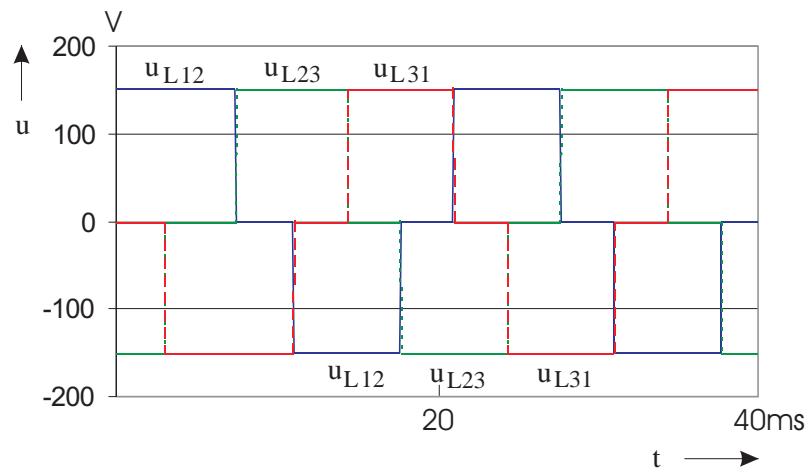


Bild 4.6: Lichtbogenknotenpotentiale

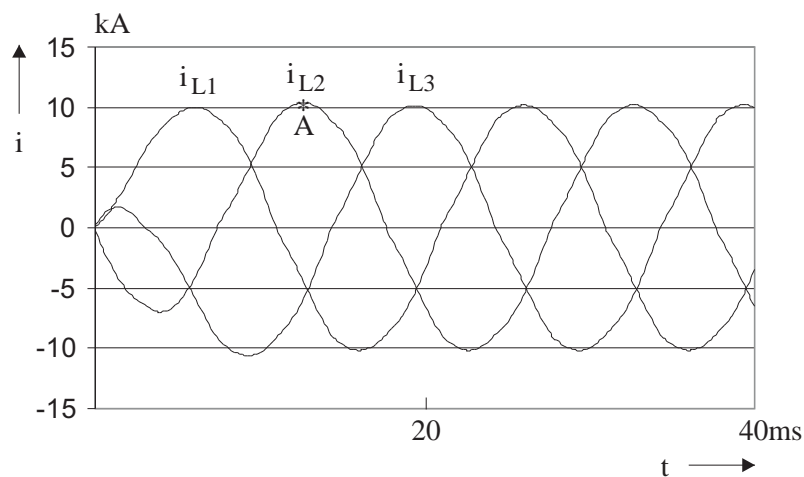


Bild 4.7: Durch das Programm LBKSTools berechnete Leiterströme

4.2.3 Berechnung des Kurzschlußstroms im Elektroenergieversorgungssystem

Das Bild 4.9 zeigt ein Elektroenergieversorgungssystem. Das System besteht aus Kabel, Belastungen, Netzeinspeisungen, Transformatoren und Asynchronmaschine. Der dreipoli-

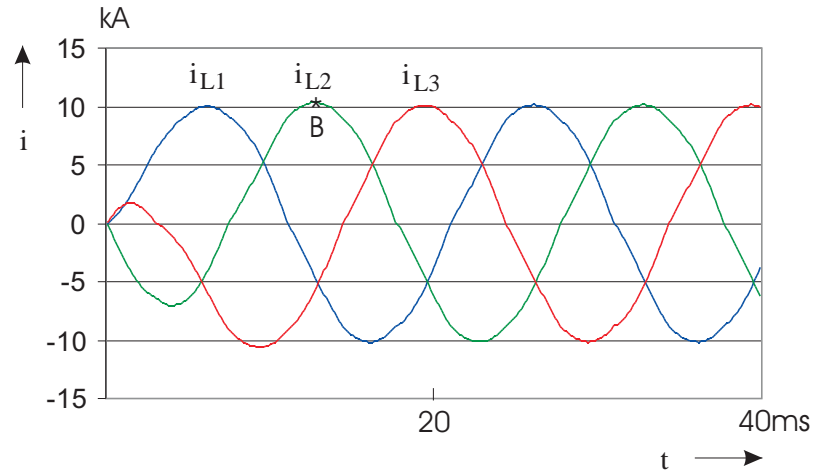


Bild 4.8: Durch das Programm MATLAB berechnete Leiterströme

ge metallische Kurzschluß entsteht an Knotenpunkt k. Der Kurzschlußstrom von Leitung 2 wurde mit LBKSTools und MATLAB berechnet. Die Berechnungsergebnisse werden in Bild 4.10 und 4.11 und Tabelle 4.1 gezeigt. Die Berechnungsfehler sind klein.

MATLAB bietet 'Power System Blockset' an. Power System Blockset kann Elektroenergieversorgungssystem in der 'Simulink' Umgebung simulieren. Man selektiert 'Block' aus 'Block Library', um die Schaltung des Elektroenergieversorgungssystems zu bilden. Die Bildung der Schaltung ist schwierig und kompliziert. Man macht häufig den Fehler 'Trouble solving algebraic loop'. Man muß Block 'Controlled Voltage Source', 'Ideal Switch', 'Gain', 'Sign', 'Product' usw. selektieren, um die Lichtbogenspannungen zu simulieren. Block 'Scope' muss in die Schaltung eingefügt werden, um Simulationsergebnisse anzuzeigen. Vor der Analyse des elektrischen transienten Vorgangs benötigt MATLAB lange Zeit, um den Arbeitspunkt zu berechnen. Wenn die Lichtbogenspannung größer als 200 V ist, kann MATLAB die Lichtbogenkurzschlussströme nicht berechnen.

Im Gegensatz zu MATLAB ist LBKSTools benutzerfreundlich. Man muß nur die Parameter und Knotenbezeichnungen der Betriebsmittel eingeben. LBKSTools berechnet erst den Lastfluss für die Anfangswerte und danach den transienten Vorgang. Es braucht nur einige Sekunde für die Berechnung der Lichtbogenkurzschlussströme in einem kleinen System. LBKSTools kann auch die Lichtbogenkurzschlussströme mit Lichtbogenspannungen über 300 V berechnen.

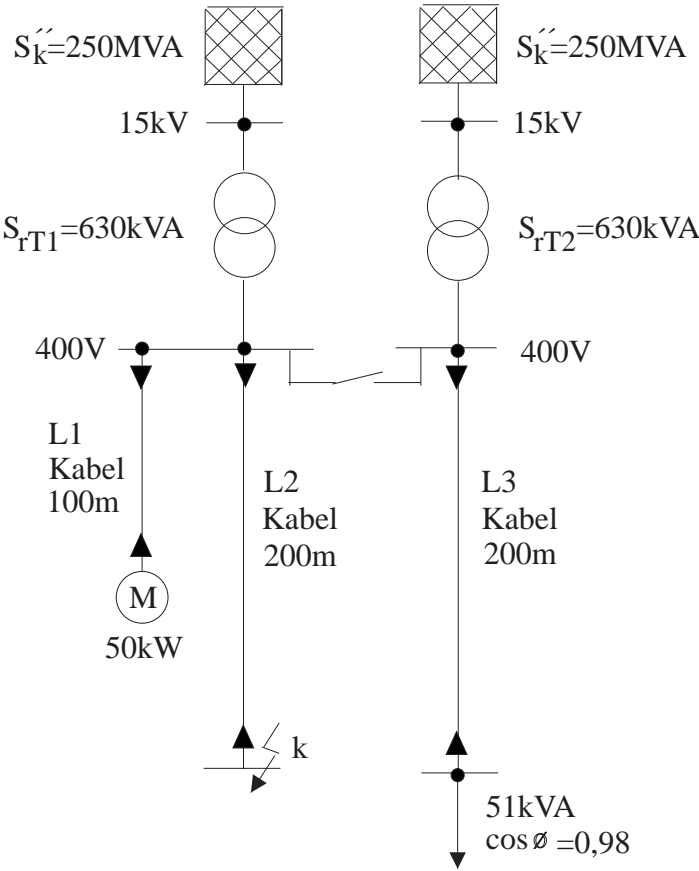


Bild 4.9: Elektroenergieversorgungssystem

LBKSTools	MATLAB	Fehler
$A_1: 6778,7 \text{ A}$	$A_2: 6787,1 \text{ A}$	0,124%
$B_1: -6835,3 \text{ A}$	$B_2: -6838,5 \text{ A}$	0,047%
$C_1: 6806,4 \text{ A}$	$C_2: 6809,8 \text{ A}$	0,05%

Tabelle 4.1: Vergleich der Berechnungsergebnisse

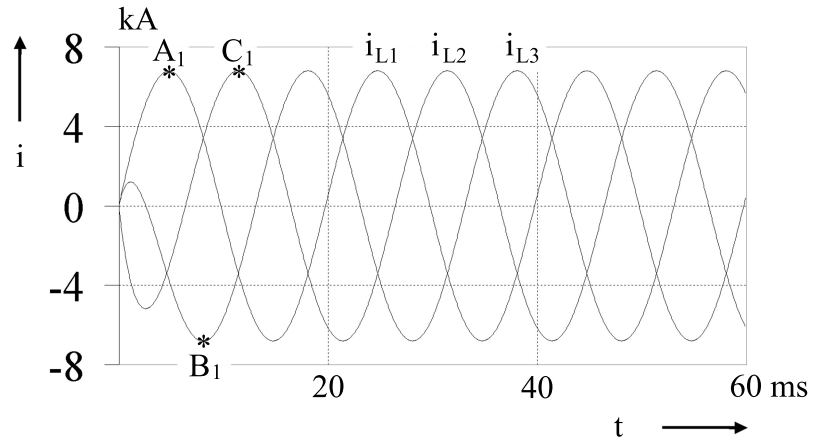


Bild 4.10: Durch das Programm LBKSTools berechnete Kurzschlußströme

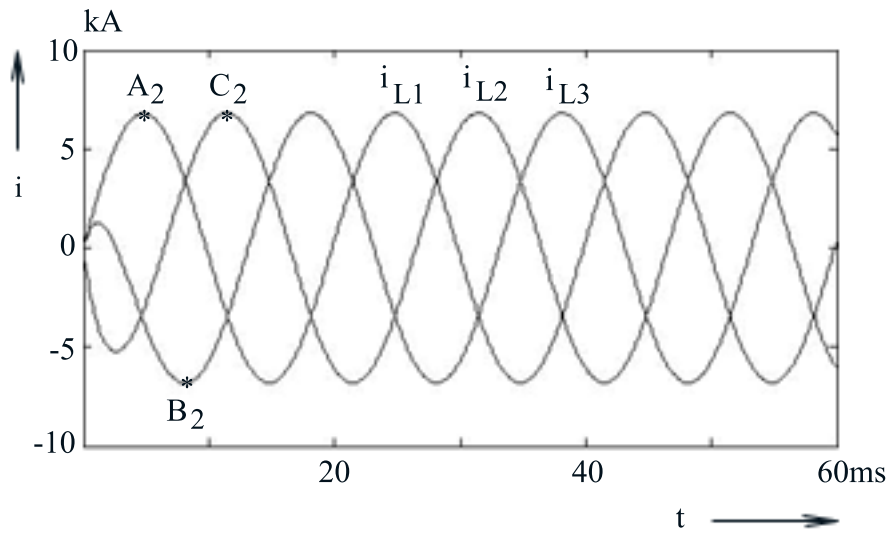


Bild 4.11: Durch das Programm MATLAB berechnete Kurzschlußströme

Kapitel 5

Einsatz von Flüssigmetallstrombegrenzern

In den Kapitel 2, 3 und 4 sind die Grundlage für die Berechnung von Elektroenergieversorgungssystemen bei auftretenden Fehlern, insbesondere zur Bestimmung von Lichtbogenkurzschlußströmen erarbeitet worden.

Aus umfangreichen Untersuchungen zu den Schutzziele und notwendigen Schutzfunktionen, die sich im Zusammenhang mit Lichtbogenkurzschlüssen ergeben, hat sich gezeigt, dass für höchste Schutzbedürfnisse der Fehlervorgang und der Lichtbogenkurzschlußstrom begrenzt werden müssen und die Begrenzung innerhalb von 5 ms nach Kurzschlußbeginn wirksam werden muß [48, 49]. Die Einrichtung zur Begrenzung (der Strombegrenzer) selbst arbeitet dann sehr effektiv, wenn kein Austauschen oder Ersetzen nach dem Begrenzungsvorgang erforderlich ist. Er soll deshalb die Eigenschaft der Selbstregenerierung besitzen. Mechanische und elektromagnetische Strombegrenzer (z.B. Leistungsschalter) können diese Forderungen nicht erfüllen. Bei Flüssigmetallstrombegrenzern kann die Flüssigkeit unmittelbar nach dem Begrenzungsvorgang wieder zur Unterbrechungsstelle zurückfließen. Damit ist die Selbstregenerierung realisierbar [25, 35, 37]. Mit der Kombination bestehend aus Flüssigmetallstrombegrenzer und Leistungsschalter erreicht man dann eine schnelle Abschaltung der Kurzschlußströme. Um das Betriebsverhalten von Elektroenergieversorgungssystemen, die mit Flüssigmetallstrombegrenzer ausgestattet sind, beschreiben zu können, ist die Berechnung der Lichtbogenkurzschlußströme in Kombination mit dem Begrenzer notwendig. Die Grundlage dafür bildet ein Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers.

Der in Flüssigmetall fließende Strom hat auf dieses Flüssigmetall thermische und dynamische Wirkungen. Die Wirkungen werden nachfolgend analysiert, um das Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers zu bilden.

Die thermische Wirkung des Kurzschlußstroms wird zuerst analysiert. Flüssigmetalle nehmen bei Zimmertemperatur den flüssigen Aggregatzustand ein. Fließt ein ausreichend hoher Strom durch das Metall, erhöht sich dessen Temperatur. In Kurzschlußfällen über-

schreitet die Temperatur den Siedepunkt, so dass das Metall verdampft und ein Lichtbogen entsteht. Der Lichtbogen stellt einen zusätzlichen Widerstand im elektrischen Netz dar. Der entstehende Spannungsabfall ist gegen die treibende Netzspannung gerichtet. Da dieser Widerstand sehr viel größer als der des Flüssigmetalls ist, setzt eine Begrenzung des Kurzschlußstroms ein.

Ein Lichtbogen entsteht nachweislich nicht, wenn die Temperatur des Flüssigmetalls niedriger als der Siedepunkt ist.

Bereits in den 70er Jahren wurden Versuche, mit Flüssigmetallstrombegrenzern durchgeführt, die mit Quecksilber gefüllt waren. Seit einigen Jahre hat man sich auf die Füllung mit einer Legierung bestehend aus Gallium, Indium und Zinn konzentriert. Diese zwei Arten Flüssigmetallstrombegrenzer haben verschiedenste Strukturen. Für zwei bestehende Strukturen von Flüssigmetallstrombegrenzer wird das jeweilige Temperaturfeld im nächsten Kapitel berechnet, um die Abhängigkeit des Betriebsverhaltens des Begrenzers von der Temperatur des Flüssigmetalls beschreiben zu können. Durch die Analyse der Änderung der Temperatur und des Stromverlaufs werden die verschiedenen Strombegrenzungsprinzipien der zwei Strukturen ermittelt.

Der im Flüssigmetall fließende Strom erzeugt eine Verlustleistung, die zu einer Temperaturerhöhung des Flüssigmetalls führt. Wegen Luftkonvektion und Strahlung gibt der Flüssigmetallstrombegrenzer Energie in Form von Wärme ab. Die Bewegung des Flüssigmetalls wirkt sich auch auf das Temperaturfeld des Flüssigmetalls aus. Im Kapitel 6 werden die Temperaturfelder berechnet.

Danach wird die dynamische Wirkung des Kurzschlußstroms analysiert. Northrop wies den Pinch-Effekt des Flüssigmetalls 1907 experimentell nach [44]. 1982 entwickelten Veretenkov A. V. und Nikolaeva L. T. einen Flüssigmetallstrombegrenzer mit GaInSn als Flüssigmetall [35].

E. Zienicke und A. Thess benutzten die Shallow Water Approximation, um den Pinch-Effekt der Legierung in zylindrischer Form zu analysieren [36]. Für die Berechnung der kritischen Stromdichte wurde eine entsprechende Gleichung abgeleitet, die die abhängigen Größen Radius, Dichte und die Gravitationsbeschleunigung beinhaltet.

Im Mai 2002 legte Krätzschmar eine Dissertation vor [37], aus der die in Bild 5.1 gezeigte Geometrie eines

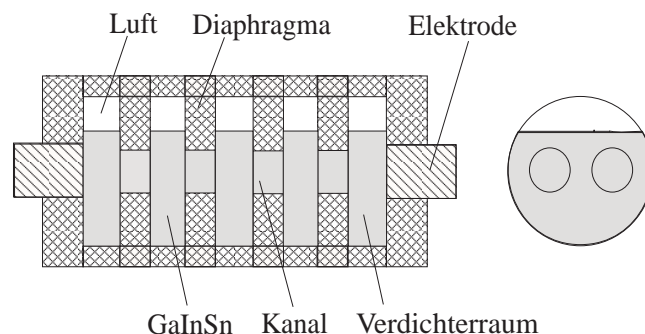


Bild 5.1: Geometrie des GaInSn-Strombegrenzers

GaInSn-Strombegrenzers entnommen wurde. Der Strombegrenzer besteht aus festmetallischen Elektroden, den Diaphragmen, den Verdichterräumen, dem Flüssigmetall GaInSn, dem freien Volumen mit Luft und dem Gehäuse. Der Strombegrenzer hat über 10 Diaphragmen. Jedes Diaphragma hat zwei Kanäle. Das Flüssigmetall füllt die Kanäle und den größten Teil des Verdichterraums aus. Alle Elemente des Strombegrenzers werden von einem Gehäuse zusammengehalten.

Wenn der Kurzschlussstrom durch das Flüssigmetall fließt, verursacht dieser nicht nur einen Temperaturstieg sondern auch ein Magnetfeld. Die Wechselwirkung zwischen Strom und Magnetfeld führt zum Entstehen magnetischer Kräfte. Diese bewirken ein Druckfeld und versetzen das Flüssigmetall in Bewegung.

Die Flüssigkeit bewegt sich laminar oder turbulent. Der Unterschied zwischen laminarem Fließen und turbulenter Strömung liegt im Verhältnis zwischen trägem Transport und viskosem Transport. Wenn dieses Verhältnis ansteigt, entwickelt sich eine Instabilität und es kommt zu einer Geschwindigkeitsschwankung. Die Reynolds-Zahl bemisst die Verhältnis zwischen träger und viskoser Kraft. Wenn die Reynolds-Zahl größer als 2300 für das Fließen im Rohr ist, tritt üblicherweise eine turbulente Strömung auf [50]. Die Reynolds-Zahl des GaInSn-Strombegrenzers ist größer als 3000 bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s. Die magnetischen Kräfte sind längs der Achse des Strombegrenzers gerichtet. Der Radius des Verdichterraums ist größer als der des Kanals. Der Verdichterraum und der Kanal haben feste Wände. Im Strombegrenzer bildet sich deshalb eine turbulente Strömung aus. Die Messergebnisse zeigen, dass Toruswirbel im GaInSn-Strombegrenzer bei 300 A auftreten [37]. Der Kurzschlussstrom ist üblicherweise größer als 300 A bei 0,2 ms nach dem Kurzschlussbeginn. Er verursacht eine turbulente Strömung im GaInSn-Strombegrenzer.

Es gibt Oberflächenspannung auf der Oberfläche der Flüssigkeit. Die Oberflächenspannung führt zu einer Schrumpfung der Oberfläche der Flüssigkeit. Außerdem verursachen Oberflächenspannung und Trägheitskraft die Oberflächenspannungswelle. Aber die Oberflächenspannung hat eine kleine Wirkung auf die turbulente Strömung im Strombegrenzers wegen der großen magnetischen Kräften während des Kurzschlusses.

Die Bewegung des Flüssigmetalls wirkt auf das Stromdichtefeld. Da die Geschwindigkeit des Flüssigmetalls jedoch niedrig ist, kann diese Wirkung vernachlässigt werden [37].

Krätzschmar analysierte die physikalischen Phänomene im GaInSn-Strombegrenzer bei Kurzschluß und berechnete den Pinch-Effekt. Er berechnet die Ansprechzeit t_A . Diese besteht aus zwei Zeitabschnitten, d. h. $t_A = t_{BG} + t_p$. Der erste Zeitabschnitt t_{BG} erstreckt sich von Stromflussbeginn bei $t=0$ bis zum Beginn des Gaseintrittes in die Diaphragmenkanäle. Der zweite Zeitabschnitt t_p beschreibt das Abschnüren der Flüssigmetallsäule selbst. Krätzschmar zeigt das 2D-Strömungsgeschwindigkeitsfeld für ein Beispiel der Einschnüristabilität, wobei eine kosinusförmige Oberfläche von Verdichterraum angenommen wird. Es wird außerdem eine 3-D Geometrie betrachtet. Der 3-D Pinch-Effekt

wird berechnet. Der Vergleich experimentell ermittelter und berechneter Ansprechzeiten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die Berechnung des Pinch-Effekts erfolgt mit dem Programm ANSYS. Die Berechnungsdetails werden in seiner Arbeit [37] nicht benannt. Darüber hinaus erfolgt ausgehend von den Feldberechnungen keine Bestimmung von elektrischen Parametern, die in einer Berechnung des elektrischen Stromkreises mit einem Flüssigmetallstrombegrenzer angewendet werden können, wie dies für die Berechnung eines begrenzenden Fehlervorganges in einem Elektroenergieversorgungssystem notwendig ist.

Im Nachfolgenden wird auf der Basis der in Bild 5.1 gezeigten Geometrie des GaInSn-Strombegrenzers die Berechnung des Pinch-Effekts mit einem neuen Modell vorgenommen. Bild 5.2 zeigt die Geometrie dieses Modells. Es enthält einen Kanal und zwei halblange Verdichterräume. Der Strom fließt im Flüssigmetall entlang der Z-Achse. Die Auswirkung der Bewegung des Flüssigmetalls auf das Stromdichtefeld wird vernachlässigt. Die relative Permeabilität des Flüssigmetalls und der Diaphragmen sind gleich 1. Bei der Berechnung des Magnetfelds wird die Luftumgebung berücksichtigt.

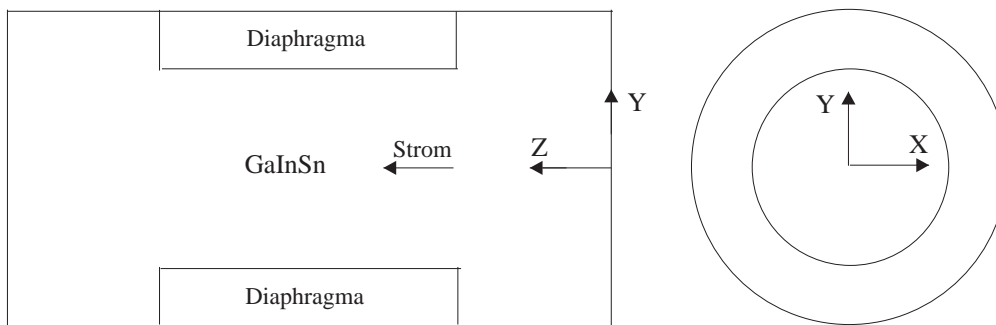


Bild 5.2: Geometrie des Modells

In den Fällen, in denen die Flüssigmetalloberfläche Kontakt mit den Wänden des Kanals oder des Verdichterraumes hat, wird die Fließgeschwindigkeit der Flüssigmetalloberfläche gleich Null gesetzt. Hat die Flüssigmetalloberfläche Kontakt mit der umgebenden Luft, wird die Oberfläche als freie Oberfläche bearbeitet. Die Gravitation und die Oberflächenspannung werden berücksichtigt.

Um den Pinch-Effekt zu beschreiben, berechnet man das Magnetfeld und das Strömungsgeschwindigkeitsfeld. Im Kapitel 7 wird die Berechnung des transienten Magnetfelds behandelt. Die Luftumgebung wird berücksichtigt. Die Auswirkung der Bewegung des Flüssigmetalls auf das Stromdichtefeld wird hingegen vernachlässigt.

Im Kapitel 8 wird die Berechnung der transienten Fluidodynamik beschrieben. Die

magnetischen Kräfte werden auf die Fluidelemente als treibende Kräfte übertragen. Die Turbulenz-Modellierung wird eingeschaltet. Die Effekte der Wände und die freie Oberfläche werden bearbeitet.

Im Kapitel 9 wird die Berechnung des Pinch-Effekts ausführlich dargestellt. Die Pinch-Effekt-Berechnung ist ein iterativer Vorgang. Bild 5.3 zeigt einen Programmablaufplan des numerischen Verfahrens. Es werden gemessene Ströme herangezogen, um die magnetische Kraftdichte zu berechnen. Die im numerischen Berechnungsmodell verwendeten wichtigen Programmbefehle werden benannt und erklärt. Die Feldverteilungen und die Änderungen der Geschwindigkeit des Flüssigmetalls werden vorgestellt.

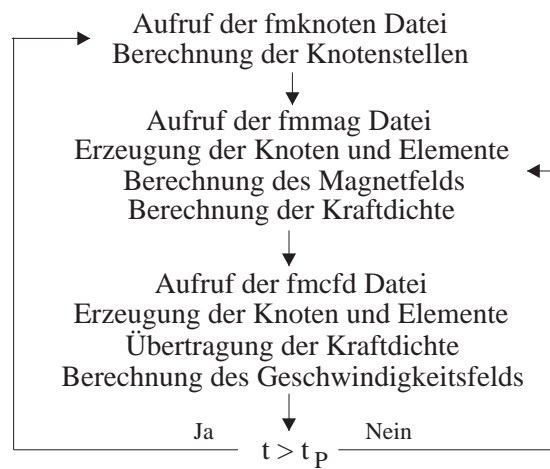


Bild 5.3: Schematischer Berechnungsablauf

Anschließend wird ein Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers aufgestellt und beschrieben. Die Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen in Energieversorgungssystemen mit Flüssigmetallstrombegrenzer erfordert eine entsprechende Modellbeschreibung des Begrenzers. Im Kapitel 10 wird das Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers abgeleitet. Die Parameter werden durch Versuchsergebnisse bestimmt. Zum Nachweis der Genauigkeit des Modells werden die simulativ ermittelten Ströme mit denen, die gemessen wurden, verglichen. Das Modell an sich beschreibt den nichtlinearen Widerstand des Flüssigmetallstrombegrenzers und kann in den in Kapitel 3 abgeleiteten Algorithmus eingefügt werden.

Nur ein Flüssigmetallstrombegrenzer mit zwei Kanäle wurde untersucht. Man hat keine Experimentdaten vom Flüssigmetallstrombegrenzer mit anderen Durchmessern. Man muß die Parameter des Modells des Flüssigmetallstrombegrenzers mit anderen Durchmessern bestimmen, um Kurzschlussströme im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer mit anderen Durchmessern zu berechnen. Bei Bestimmung der Parameter des Modells wird es angenommen, dass sich die Widerstände umgekehrt propor-

tional zur Querschnittsfläche von zwei Kanälen verhalten. Die Konstante K_A wird durch Druckfeldberechnung ermittelt und damit die Zeiten t_A , t_{im} und t_{um} bestimmt.

Im Kapitel 11 wird schließlich das Betriebsverhalten des Strombegrenzers in Bezug auf die Begrenzungseigenschaft, die Selektivität und die Leistungsverluste des Strombegrenzers selbst dargestellt.

Kapitel 6

Temperaturfeldberechnung

In diesem Kapitel werden die Temperaturfelder des Flüssigmetallstrombegrenzers berechnet und die Begrenzungsprinzipien verglichen.

6.1 Grundgleichungen der Wärmeübertragung

Das Temperaturfeld des Flüssigmetallstrombegrenzers wird auf der Grundlage des ANSYS-Programms berechnet. ANSYS benutzt die folgenden Grundgleichungen der Wärmeübertragung [50]:

6.1.1 Wärmeleitung und Konvektion

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist der Energieerhaltungssatz. Der Satz kann dargestellt werden als

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = q''' \quad (6.1)$$

mit

ρ Dichte

c spezifische Wärmekapazität

T Temperatur

t Zeit

$\{L\}$ $\left\{ \frac{\partial}{\partial X} \quad \frac{\partial}{\partial Y} \quad \frac{\partial}{\partial Z} \right\}^T$

$\{v\}$ $\{v_x \quad v_y \quad v_z\}^T$

Vektor der Geschwindigkeit für die Massenüberführung der Wärme

$\{q\}$ Vektor der Wärmeströme

q''' Wärmeerzeugungsrate der Einheitsvolumina

Außerdem wird der Fouriersatz genutzt, um eine Verbindung zwischen den Wärmeströmen und den thermischen Gradienten herzustellen.

$$\{q\} = -[D]\{L\}T \quad (6.2)$$

mit

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & K_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & K_{ZZ} \end{bmatrix} \text{ Wärmeleitfähigkeitsmatrix}$$

K_{XX}, K_{YY}, K_{ZZ} Wärmeleitfähigkeit in X,Y,Z Richtungen des Elements

Die Kombination von 6.1 und 6.2 ergibt

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + q''' \quad (6.3)$$

Der Rechnung liegen folgende Randbedingungen zugrunde, wobei angenommen wird, dass die Vorgänge über die gesamte Oberfläche des Begrenzerelements verteilt sind.

1. Die Temperatur auf die Oberfläche S_1

$$T = T^* \quad (6.4)$$

mit T^* angegebene Temperatur

2. Wärmeströme auf die Oberfläche S_2

$$\{q\}^T \{\eta\} = -q^* \quad (6.5)$$

mit

$\{\eta\}$ Normalenvektor

q^* angegebene Wärmeströme

3. Wärmeübergang auf die Oberfläche S_3

$$\{q\}^T \{\eta\} = -h_f (T_B - T_S) \quad (6.6)$$

mit

h_f Film Koeffizient

T_B Temperatur der benachbarten Strömungsmittel

T_S Temperatur der Oberfläche des Modells

Die Kombination von 6.2, 6.5 und 6.6 ergibt

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = q^* \quad (6.7)$$

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = h_f (T_B - T) \quad (6.8)$$

Die Integration von 6.3 über das Volumen des Elements und Kombination von 6.7 und 6.8 liefert

$$\int_{vol} \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) d(vol) = \int_{S_2} \delta T q^* d(S_2) + \int_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) d(S_3) + \int_{vol} \delta T q''' d(vol) \quad (6.9)$$

mit
 vol Volumen des Elements
 δT zulässige virtuelle Temperatur

6.1.2 Wärmestrahlung

Durch die Erweiterung des Stefan-Boltzmann-Gesetz auf eine zwei-Oberflächen-Radiationsgleichung ist die Wärmeübertragungsrate zwischen zwei Oberflächen i und j

$$Q_i = \sigma \epsilon_i F_{ij} A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (6.10)$$

mit
 Q_i Wärmeübertragungsrate von der Oberfläche i
 σ Stefan-Boltzmann-Konstante
 ϵ_i Effektiver Emissionsgrad der Oberfläche i
 F_{ij} Formfaktor von Oberfläche i nach Oberfläche j
 A_i Fläche der Oberfläche i
 T_i, T_j Temperatur auf der Oberfläche i und j.

6.2 PLANE67 2D Thermisch-elektrisches Element

Das ANSYS-Programm verwendet eine Gleichung des Wärmegleichgewichts, die vom Grundsatz der Erhaltung der Energie abgeleitet ist. Es bietet die Möglichkeit, alle drei grundsätzlichen Arten der Wärmeübertragung, nämlich Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung zu berechnen.

Das ANSYS-Programm beinhaltet eine Elementbibliothek mit etwa 120 Standardelementen. Man wählt ein oder mehrere Element aus, um ein Temperaturfeld, ein elektrostatisches Feld, ein Magnetfeld, oder fluidodynamische Strukturen zu berechnen.

Um das Temperaturfeld eines Flüssigmetallstrombegrenzers zu simulieren, wählt man das 2D thermisch-elektrische Element von PLANE67 aus.

Das Element PLANE67 hat thermische und elektrische Eigenschaften. Die vom elektrischen Strom erzeugte Joule'sche Wärme ist im Wärmegleichgewicht berücksichtigt. Das Element hat 4 Knoten mit 2 Freiheitsgraden : Temperatur und Spannung pro Knoten. Mit dem Element kann ein zweidimensionales stationäres oder transientes Temperaturfeld berechnet werden. Die Geometrie, die Knotenpunkte, und das Koordinatensystem für PLANE67 werden im Bild 6.1 gezeigt.

Für stationäre Berechnungen können bezüglich der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte beliebige Werte eingegeben werden. Der spezifische Widerstand kann als Tem-

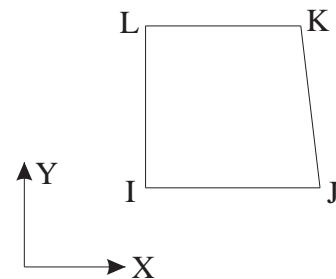


Bild 6.1: Element PLANE67

peraturfunktion, und die Konvektion als Oberflächenlast an der Elementoberfläche eingegeben werden. Das Element muß in der x,y-Ebene liegen, und die y-Achse muß die Rotationsachse sein. Ein rotationssymmetrisches Modell sollte im Bereich positiver x-Werte definiert werden.

6.3 GaInSn-Strombegrenzer

6.3.1 Geometrie des GaInSn-Strombegrenzers

Die Firma Moeller hat einen Flüssigmetallstrombegrenzer für Versuchszwecke aufgebaut, wobei das Flüssigmetall aus der Legierung GaInSn besteht [37]. Die Anordnung besteht aus einem isolierenden Gehäuse, welches die Festmetallelektroden aufnimmt und durch mehr als 10 Diaphragmenscheiben unterteilt wird. Die sich zwischen den Diaphragmen befindlichen Verdichterräume sind teilweise mit Flüssigmetall gefüllt, d.h. es gibt leere Räume über dem Flüssigmetall. Jede Diaphragmenscheibe besitzt zwei Öffnungen. Durch die Öffnungen wird eine elektrische Verbindung zwischen den Verdichterräumen realisiert.

Die Parameter der Materialien sind:

Isolator

Dichte: 2400 kg/m³

Wärmeleitfähigkeit: 0,35 W/(m K)

spezifische Wärmekapazität: 870 J/(kg K)

GaInSn

Siedetemperatur: 2353 K

spezifische Wärmekapazität: 343 J/(kg K)

Temperatur K	293	323	373	423	473	523	573
Dichte kg/m ³	6620	6540	6480	6440	6400	6360	6280
Wärmeleitfähigkeit W/(m K)	31	35	39	42	45	47	49
spez. Widerstand $\times 10^{-6} \Omega m$	0,28	0,288	0,302	0,316	0,33	0,3438	0,3584

Tabelle 6.1: Parameter von GaInSn

6.3.2 Idealisierung

Die Anwendung des ANSYS-Programms zur Lösung einer FEM-Berechnungsaufgabe setzt sich aus folgenden Arbeitsschritten zusammen:

- * Idealisierung
- * Modellerstellung
- * Lösung und
- * Auswertung des Ergebnisse

Das Temperaturfeld wird nach diesen vier Arbeitsschritten berechnet.

Das Bild 6.2 zeigt die Geometrie des berechneten Kanals. Im Bild 6.2 sind r der Radius des Kanals und r_v der Radius des Verdichterraums.

Wegen der Symmetrie wurde das Temperaturfeld nur eines Kanals berechnet. Das Temperaturfeld des halblangen Kanals und halblangen Verdichterraums wird simuliert. Die höchste Temperatur entsteht am Kanalrand (C-C'-Querschnitt). Der Kanal ist zylinderförmig und rotationssymmetrisch, so dass eine zweidimensionale Modellierung ausreicht. Das Modell wird in der X,Y-Ebene erstellt, wobei die X-Richtung die radiale und die Y-Richtung die axiale Ausdehnung darstellt. Für diese Erfordernisse der rotations-symmetrischen Anwendung steht das ebene Element des ANSYS-Typs PLANE67 zur Verfügung. Bei der Modellerstellung werden die Knoten und die Elemente festgelegt. Der spezifische Widerstand ist temperaturabhängig.

Die bei den Rechnung verwendeten Stromwerte entsprechen gemessenen Strömen [37]. Die Bewegung des Flüssigmetalls wirkt auf das Stromdichtefeld. Die Auswirkung kann vernachlässigt werden weil die Geschwindigkeit des Flüssigmetalls niedrig ist [37].

Die Konvektionskoeffizient für natürliche Konvektion im Gas ist üblicherweise zwischen 1 und 20 W/m²K [54]. Die Konvektionskoeffizient für elektronische Gerät ist ungefähr 4,7 W/m²K [55]. Die Konvektionskoeffizient 5 W/m²K wird deshalb für die Berechnung des Temperaturfelds vom Flüssigmetallstrombegrenzer benutzt.

Die Problemlösung erfolgt mit einer transienten Temperaturfeldberechnung. Der transiente Vorgang wird in einem Zeitbereich von nur 3 ms berechnet. Die Auswirkung der Strahlung wird deshalb vernachlässigt.

Die Bewegung des Flüssigmetalls wirkt auf das Temperaturfeld. Die Auswirkung auf die Temperatur in der Mitte des Kanals im D-D'-Querschnitt (im Bild 6.3) ist sehr gering, da die Geschwindigkeit des Flüssigmetalls im D-D'-Querschnitt niedrig ist. Das Ziel der Temperaturfeldberechnung besteht darin, die thermische Wirkung auf die Strombegrenzung beurteilen zu können.

6.3.3 Auswertung des Ergebnisse

Im Bild 6.4 ist der gemessene Strom durch den GaInSn-Strombegrenzer bezogen auf den Bezugsstrom i_B in Prozent dargestellt [37, 53]. Der Kurzschlußstrom wurde 2,2 ms nach Beginn des Kurzschlusses begrenzt.

Das Bild 6.3 zeigt das Temperaturfeld des GaInSn-Strombegrenzers. Bild 6.5 die Temperaturen im C-C'-Querschnitt im Bild 6.3 und Bild 6.6 die Temperaturen der Y-Achse. 100% im Bild 6.6 entspricht 100% Länge des im Bild 6.2 gezeigten Modells in der Y-Richtung. Die höchste Temperatur entsteht im C-C'-Querschnitt in der Nähe der Kanal-

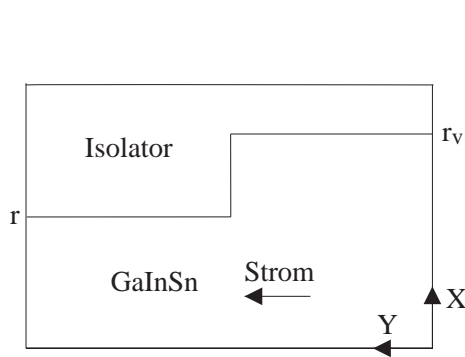


Bild 6.2: 2D Geometrie des berechneten Kanals

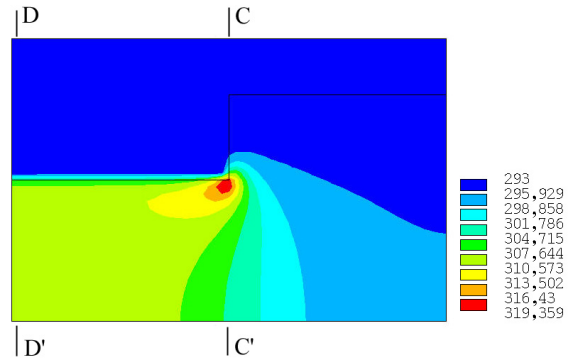


Bild 6.3: Verteilung der Temperaturen

wand. Die Kurven T_1 , T_2 , T_3 und T_4 entsprechen den Temperaturen für die Zeitpunkte 1,8, 2, 2,2 und 2,9 ms nach dem Kurzschlußbeginn. Bild 6.7 zeigt den höchsten Temperatur im GaInSn-Strombegrenzer im Schnitt C-C'.

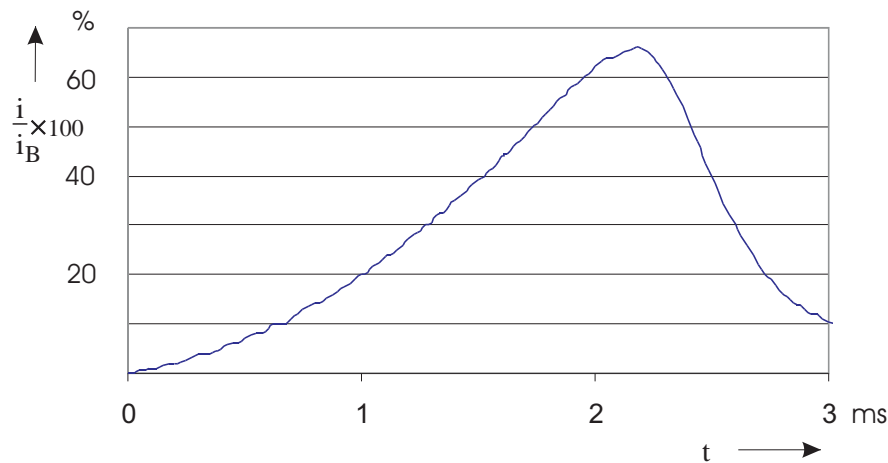


Bild 6.4: Gemessener Kurzschlußstrom

Der Spitzenkurzschlußstrom trat 2,2 ms nach Kurzschlußbeginn auf. Die höchste Temperatur des Flüssigmetallstrombegrenzers betrug 319,359 K 2,9 ms nach Beginn des Kurzschlusses. Die reale höchste Temperatur des Flüssigmetallstrombegrenzers war wegen der Bewegung des Flüssigmetalls kleiner als die im Bild 6.7 gezeigten Werte und weitaus niedriger als die Siedetemperatur von 2353 K. D. h. wenn die Querschnittsfläche des Flüssigmetalls sich nicht ändern würde, entstünde 2,2 ms nach Beginn des Kurzschlusses kein Lichtbogen. Aber das Experiment zeigt, dass ein Lichtbogen zu dem Zeitpunkt entsteht und der Kurzschlußstrom begrenzt wird. Man kann deshalb schlussfolgern, dass die Querschnittsfläche des Flüssigmetalls wegen des Pinch-Effekts vor diesem Zeitpunkt eingeschnürt wird. Der Kurzschlußstrom wird begrenzt, weil der Pinch-Effekt eintritt und danach ein Lichtbogen entsteht.

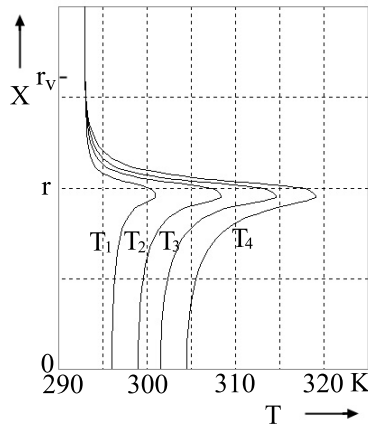


Bild 6.5: Temperaturen im C-C'-Querschnitt

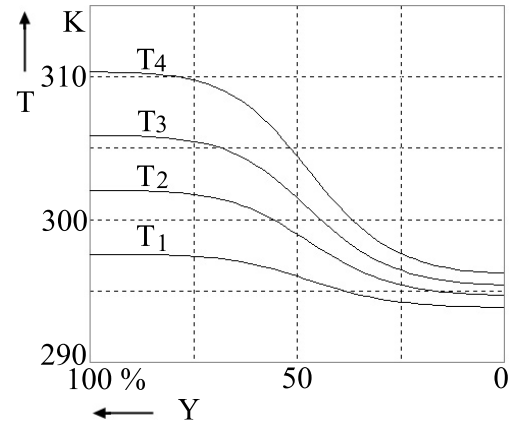


Bild 6.6: Temperaturen der Y-Achse

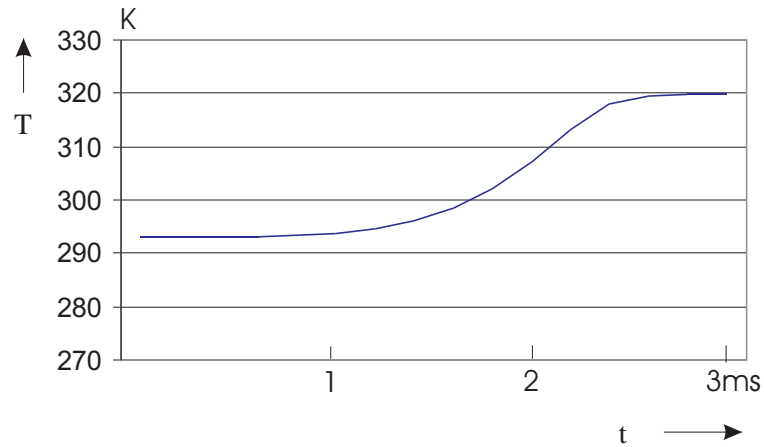


Bild 6.7: Zeitverlauf der höchsten Temperatur im GaInSn-Strombegrenzer

Die Gültigkeit der ausgeführten Temperaturfeldberechnung kann wie folgt bewiesen werden. Die elektrische Energie ist [37]:

$$W = \frac{L}{\sigma A} \int i^2 dt \quad (6.11)$$

mit

σ spez. elektrische Leitfähigkeit

L Länge des Kanals

A Fläche des Querschnitts des Kanals

Wenn die Kanaltemperatur des Strombegrenzers von T_0 auf T_t steigt, ist die durch

Flüssigmetall im Kanal absorbierte Energie:

$$W_{ab} = \rho L A c (T_t - T_0) \quad (6.12)$$

Nach den Formeln 6.11 und 6.12 bekommt man die durchschnittliche Kanaltemperatur $T_t = 312,6 \text{ K}$.

6.4 Hg-Strombegrenzer

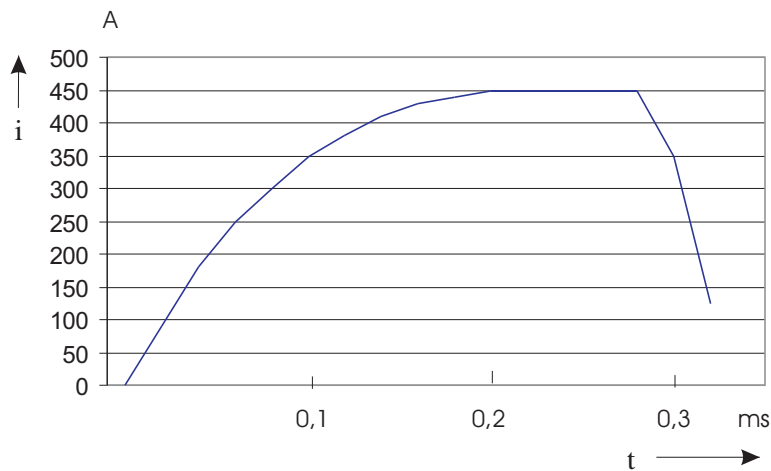


Bild 6.8: Gemessener Strom des Hg-Strombegrenzers

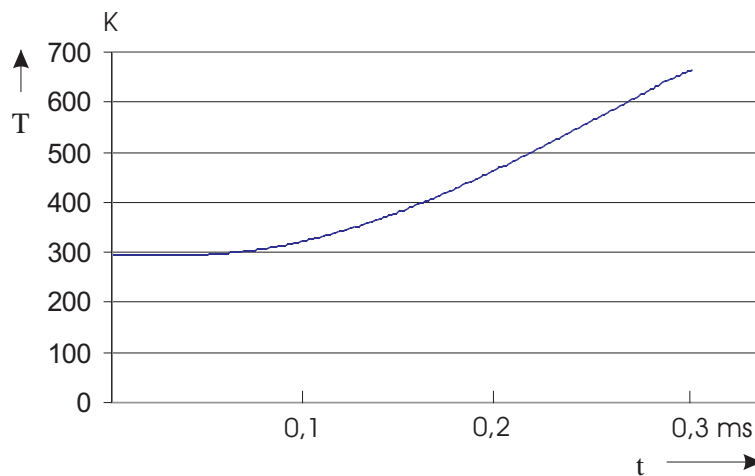


Bild 6.9: Zeitverlauf der höchsten Temperatur im Hg-Strombegrenzer

N.D. Jones and L.P. Harris untersuchten einen Quecksilber-Strombegrenzer, wobei der Kanaldurchmesser 0,57 mm betrug [25]. Der Strom stieg von 0 auf 450 A. Die Spannung und der Widerstand des Strombegrenzers stiegen ab 0,28 ms stark an und der Strom nahm entsprechend ab.

Die Parameter des Quecksilbers sind [34]:

Dichte: 13546 kg/m³

Wärmeleitfähigkeit: 8,3 W/(m K)

spezifische Wärmekapazität: 139 J/(kg K)

Siedetemperatur: 629,88 K

Die folgende spezifische Widerstände wurden für die Berechnung der Temperatur genutzt.

Temperatur K	293	323	373	423	473	523	573
spez. Widerstand $\times 10^{-6} \Omega m$	0,96	0,987	1,038	1,094	1,156	1,224	1,297

Tabelle 6.2: Parameter von Hg

Das Bild 6.8 zeigt den gemessenen Strom [25]. Das Bild 6.9 stellt den berechneten Temperaturverlauf im Hg-Strombegrenzer dar. Die höchste Temperatur des Hg-Strombegrenzers betrug 634 K bei 0,28 Millisekunden und war damit größer als die Siedetemperatur von 629,88 K. Das bedeutet, der Lichtbogen entstand vor Ablauf von 0,28 ms. Der thermische Effekt war somit die Hauptursache der Strombegrenzung.

Man kann die durchschnittliche Kanaltemperatur mit den Formeln 6.11 und 6.12 abschätzen. Die elektrische Energie ist $137,4 \times L$ bezogen auf 0,28 ms. Die Temperatur beträgt $T_t = 589,2$ K für den spezifischen Widerstand von $0,96 \mu\Omega m$. Der spezifische Widerstand steigt mit der Temperatur. Die durchschnittliche Temperatur ist deshalb größer als 589,2 K bei 0,28 ms.

Kapitel 7

Magnetfeldberechnung

ANSYS enthält kein Standardelement zur 3D Pinch-Effekt-Berechnung. Deshalb müssen erst die magnetischen Kräfte und dann die Strömungsgeschwindigkeit des Flüssigmetalls berechnet werden. Die 3D Magnetfeldberechnung des Flüssigmetallstrombegrenzers wird in diesem Kapitel behandelt.

7.1 Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes

ANSYS berechnet das Magnetfeld nach den Maxwell'schen Gleichungen des elektromagnetischen Feldes [50]:

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (7.1)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (7.2)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (7.3)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (7.4)$$

mit

∇	Vektoroperator Nabla
$\{H\}$	Vektor der magnetischen Feldstärke
$\{J\}$	Vektor der Stromdichte
$\{D\}$	Vektor der elektrischen Flußdichte
$\{E\}$	Vektor der elektrischen Feldstärke
$\{B\}$	Vektor der magnetischen Flußdichte
ρ	elektrische Ladungsdichte
t	Zeit

Die o.g. Feldgleichungen werden durch die Werkstoffbeziehungen ergänzt, die die Eigenschaften der elektromagnetischen Werkstoffe beinhalten. Die Beziehung für Magnetfelder, in der die Werkstoffeigenschaften enthalten sind lautet:

$$\{B\} = [\mu]\{H\} + \mu_0\{M_0\} \quad (7.5)$$

mit

$[\mu]$ Matrix der magnetische Permeabilität

$\{M_0\}$ Vektor der intrinsischen Remanenzmagnetisierung

Für elektrische Felder gilt

$$\{J\} = [\sigma][\{E\} + \{v\} \times \{B\}] \quad (7.6)$$

$$\{D\} = [\epsilon]\{E\} \quad (7.7)$$

mit

$[\sigma]$ Matrix der elektrische Leitfähigkeit

$[\epsilon]$ Matrix der Permittivität

$\{v\}$ Vektor der Geschwindigkeit

Man benutzt normalerweise die Potentialfunktionen zur Magnetfeldberechnung. Mit der Methode des magnetischen Vektorpotentials lassen sich 2D und 3D elektromagnetische Felder berechnen. Die folgenden Gleichungen erfassen statische und dynamische Felder unter Vernachlässigung des Verschiebungsstroms :

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} \quad (7.8)$$

$$\nabla \times \{E\} = -\left\{\frac{\partial B}{\partial t}\right\} \quad (7.9)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (7.10)$$

Eine Lösung erhält man durch Einführung des Potentials. $\{B\}$ und $\{E\}$ können durch die Potentiale ausgedrückt werden :

$$\{B\} = \nabla \times \{A\} \quad (7.11)$$

$$\{E\} = -\left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\} - \nabla V \quad (7.12)$$

mit

$\{A\}$ magnetisch Vektorpotential

V elektrisch Skalarpotential

Die sich ergebenden Differentialgleichungen lauten:

$$\nabla \times [\nu] \nabla \times \{A\} - \nabla \nu_e \nabla \cdot \{A\} + [\sigma] \left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\} + [\sigma] \nabla V - \{v\} \times [\sigma] \nabla \times \{A\} = \{0\} \quad in \Omega_2 \quad (7.13)$$

$$\nabla \cdot \left(-[\sigma] \left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\} - [\sigma] \nabla V + \{v\} \times [\sigma] \nabla \times \{A\} \right) = \{0\} \quad in \Omega_2 \quad (7.14)$$

$$\nabla \times [\nu] \nabla \times \{A\} - \nabla \nu_e \nabla \cdot \{A\} = \{J_s\} + \nabla \times \frac{1}{\nu_0} [\nu] \{M_0\} \quad in \Omega_0 + \Omega_1 \quad (7.15)$$

mit

$$[\nu] = [\mu]^{-1}$$

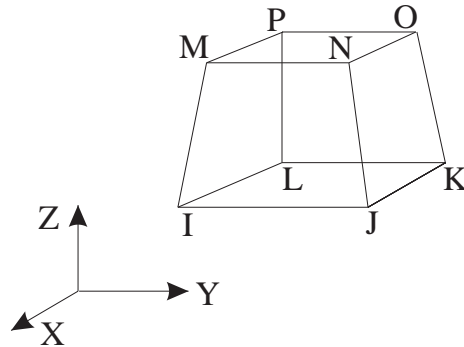


Bild 7.1: Elementtyp SOLID97

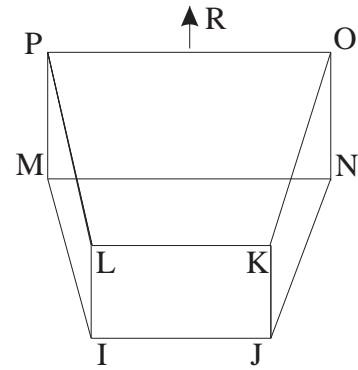


Bild 7.2: Elementtyp INFIN111

$$\nu_e = \frac{1}{3} \text{tr}[\nu] = \frac{1}{3}(\nu(1, 1) + \nu(2, 2) + \nu(3, 3))$$

Ω_0 freier Raum

Ω_1 nichtleitfähiger permeabler Bereich

Ω_2 leitfähiger Bereich

Das 3D Vektorpotential soll nicht für das Modell benutzt werden, das die Materialien mit verschiedenen Permeabilitäten enthält.

7.2 SOLID97 3D magnetisches Volumenelement

SOLID97 modelliert 3D Magnetfelder. Das Element wird durch 8 Knoten definiert und kann bis zu 5 Freiheitsgrade berücksichtigen, d.h., das magnetische Vektorpotential, das elektrische Skalarpotential und den elektrischen Strom pro Knoten. SOLID97 beruht auf die Formulierung des magnetischen Vektorpotentials mit 'Coulomb gauge' und wird zur Analyse von Niederfrequenzmagnetfeldern, z. B. in der Magnetostatik, von Wirbelströmen und von durch Spannung angeregte Magnetfelder verwendet. Das Element kann die B-H-Kurve und die Entmagnetisierungskurve modellieren.

Das Bild 7.1 zeigt das Element SOLID97.

Um der Kontinuitätsgleichung zu entsprechen, muß die Quellenstromdichte quellenfrei sein. Zur transienten Analyse muß der Freiheitsgrad des elektrischen Skalarpotentials in allen Bereichen mit einem spezifischem Widerstand verschieden von Null selektiert werden.

7.3 INFIN111 3D Infinites Randelement

Der Elementtyp INFIN111 modelliert einen offenen Rand eines unendlichen 3D Feldes. Eine Schicht von Elementen wird benutzt, um einen äußeren Teilbereich des halb-unendlichen Umgebungsbereichs mitzuerfassen. Das Element besitzt 8 oder 20 Knoten

mit 3D magnetischem Skalar- / Vektorpotential, Temperatur und elektrostatischem Potential als Freiheitsgrade an jedem Knoten. Die umschlossenen Elemente können solche des Elementtyps SOLID97 sein. Mit den Freiheitsgraden des magnetischen Potentials oder der Temperatur kann die Analyse linear, nichtlinear, stationär oder dynamisch sein. Die Materialeigenschaften müssen als endliche Werte definiert werden. Jedes INFIN111 Element muß als eine und nur eine Oberfläche als eine unendliche Oberfläche definiert sein.

Das Bild 7.2 zeigt das Element INFIN111 mit 8 Knoten.

7.4 Magnetfeldberechnung

7.4.1 Idealisierung

Das transiente Magnetfeld wird berechnet, um die magnetischen Kraftdichte beschreiben zu können. Die magnetische Kraftdichte bildet die Ausgangsgröße zu der im nächsten Kapitel beschriebenen Berechnung des Strömungsfeldes bzw. der Fluidodynamik, wobei diese Berechnung letztlich zur Beschreibung der Bewegungsgeschwindigkeit des Flüssigmetalls dient. Das Bild 5.2 zeigt die Geometrie des analysierten Flüssigmetallstrombegrenzers.

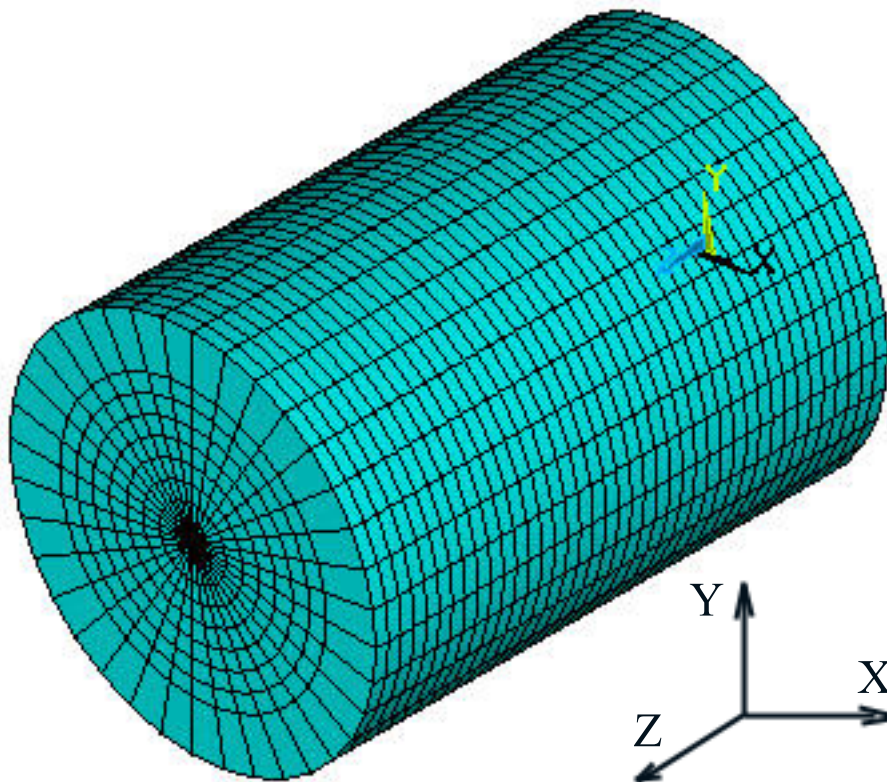


Bild 7.3: 3D Elementaufteilung des analysierten Flüssigmetallstrombegrenzers

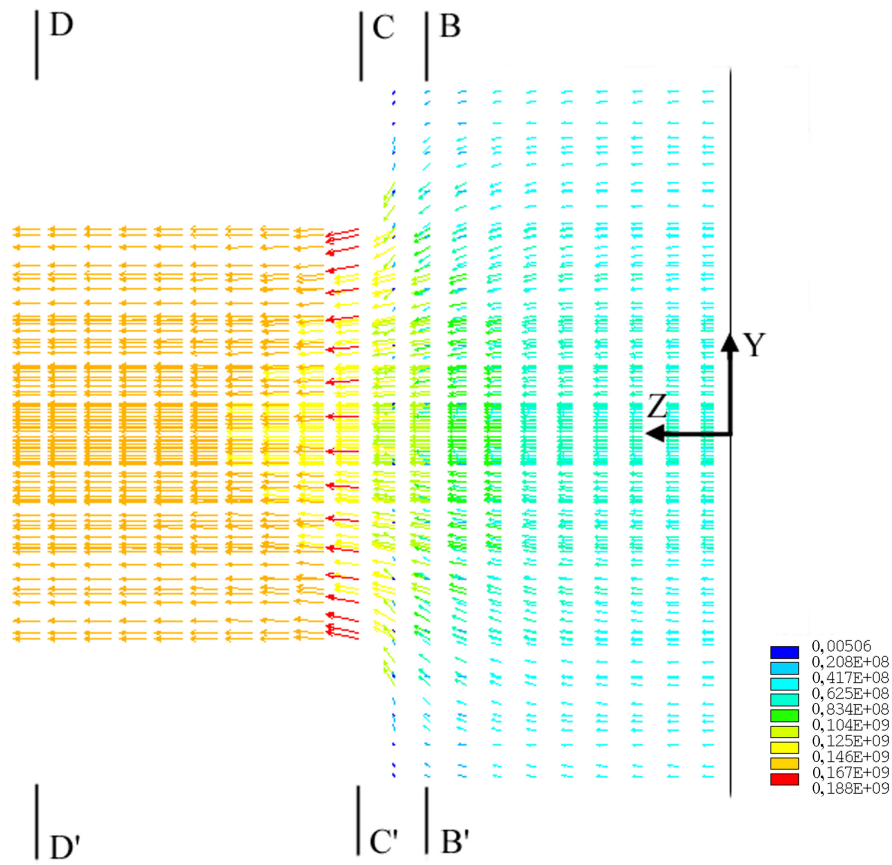
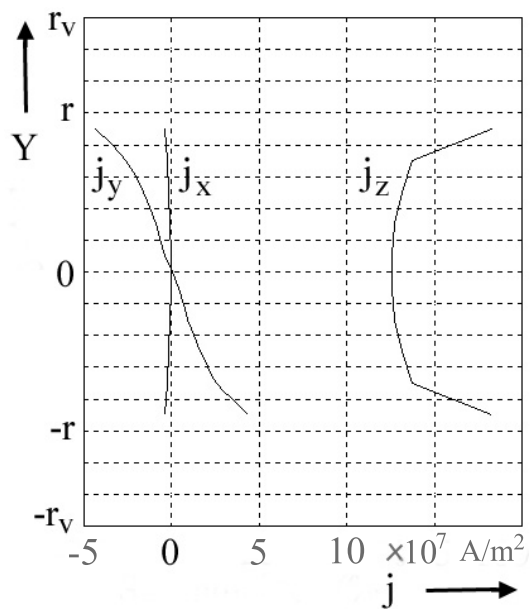
Die Teile des Flüssigmetalls und des Diaphragmas werden mit 3D Magnetfeldelementen des ANSYS-Typs SOLID97 idealisiert. Weil die relative Permeabilität des Flüssigmetalls und vom Diaphragma 1 sind, wird die Luft mit 3D Infinites Randelementen INFIN111 idealisiert. Jedes Element wird als Quader mit 8 Eckknoten ausgeführt. Das Bild 7.3 zeigt die 3D Elementaufteilung des analysierten Flüssigmetallstrombegrenzers. Die inneren Elemente sind SOLID97 und der Außenschnitt ist INFIN111. 12960 Elemente wurden erstellt. Das Magnetfeld wird durch den Gleichstrom erzeugt. Die Knoten bewegen sich während der Magnetfeldberechnung nicht.

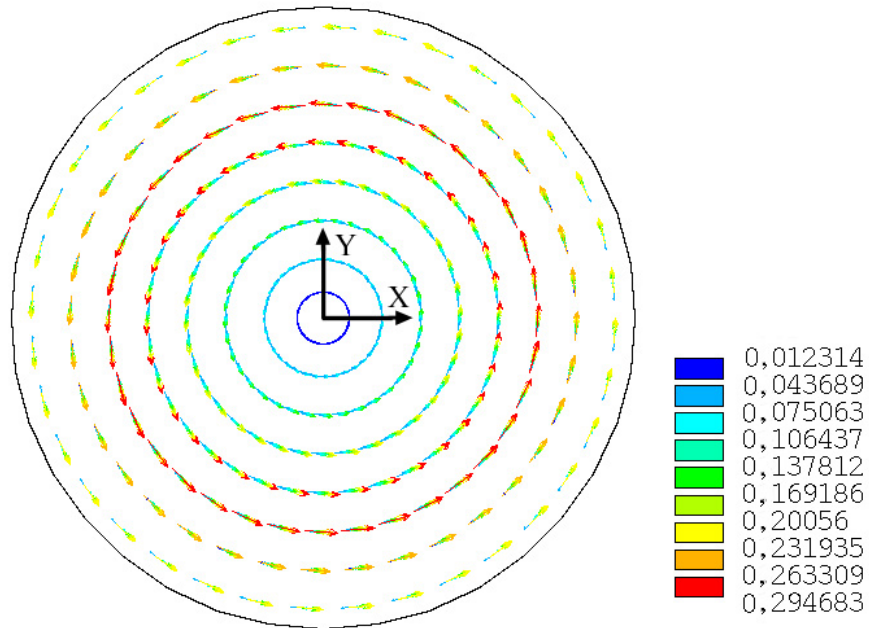
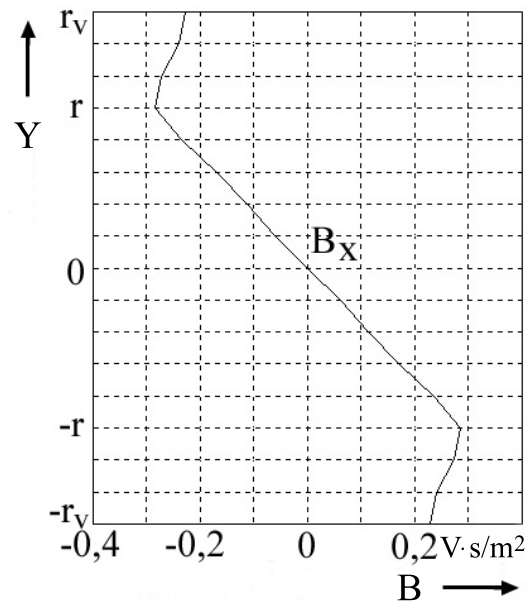
7.4.2 Auswertung des Ergebnisse

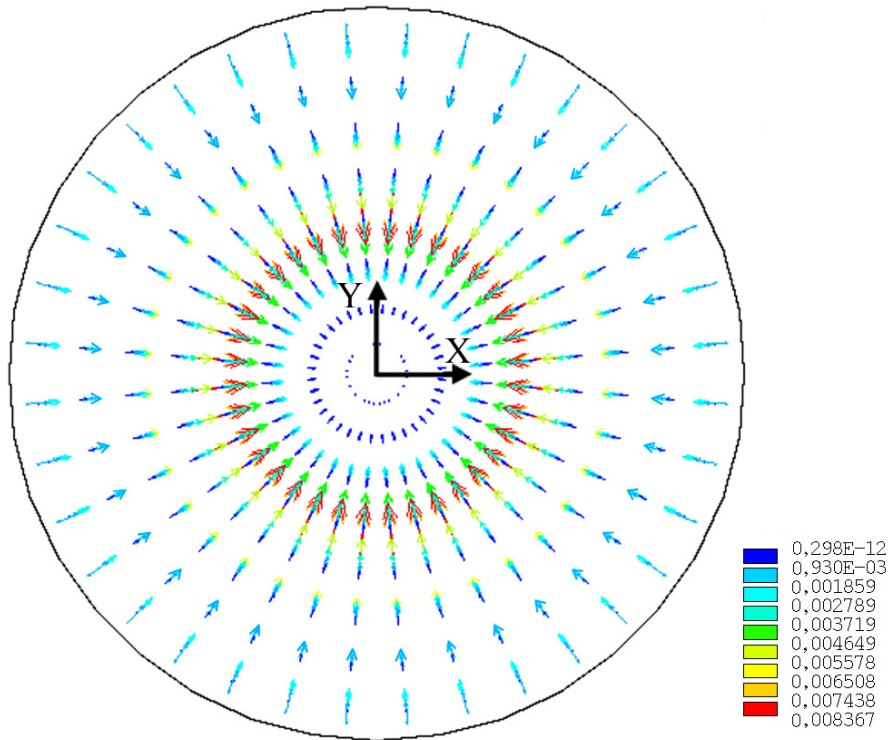
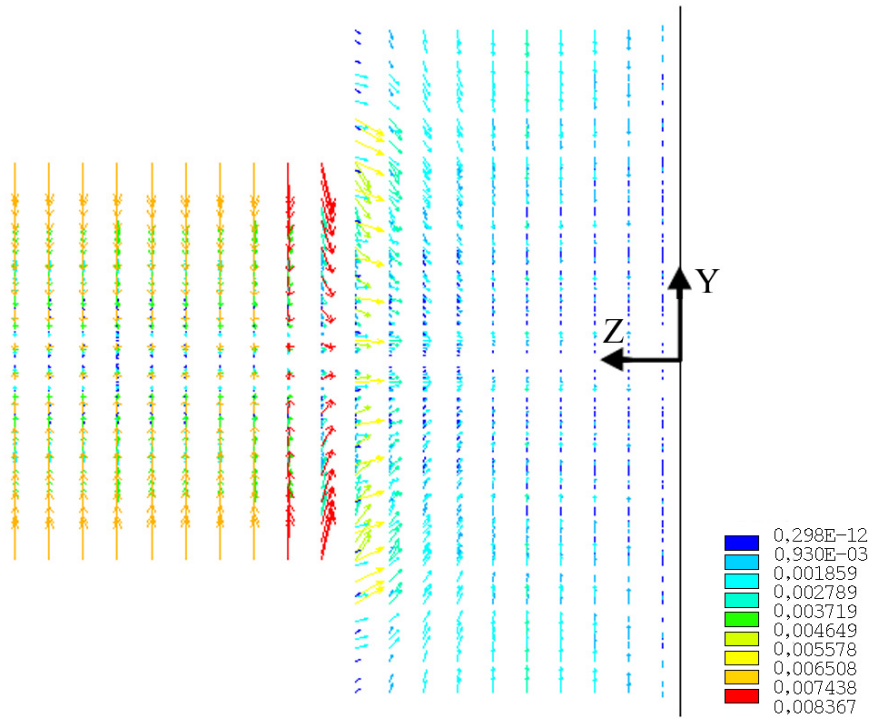
Bild 7.4 zeigt die Stromdichteverteilung und die Stromrichtung. Die Bewegung des Flüssigmetalls wirkt auf das Stromdichtefeld. Die Auswirkung der Bewegung des Flüssigmetalls auf das Stromdichtefeld wird vernachlässigt. Der Strom fließt durch das Flüssigmetall. Die Z-Komponente der Stromdichte im D-D'-Querschnitt ist nahezu gleich und die X,Y-Komponenten sind sehr klein. Bild 7.5 zeigt die Stromdichte bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt. Die X-Komponente ist sehr klein. Die Y-Komponente ist nach der Achse des Kanals gerichtet. Die größte Stromdichte entsteht im C-C'-Querschnitt in der Nähe der Wand. r im Bild 7.5 ist der Radius des Kanals und r_v ist der Radius des Verdichterraums.

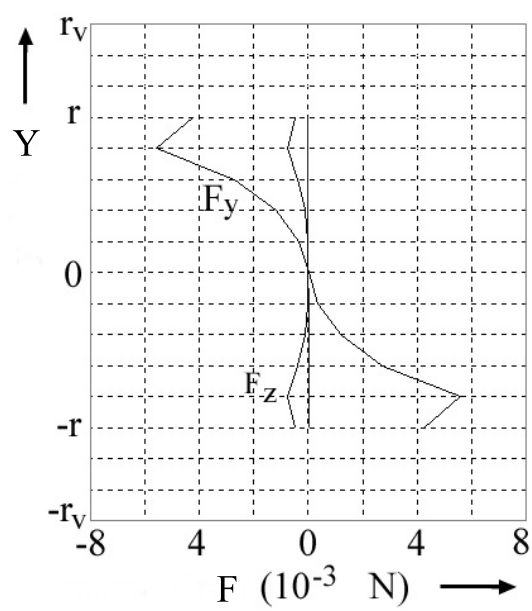
Bild 7.6 zeigt die magnetische Flußdichteverteilung im Flüssigmetallstrombegrenzer. Bild 7.7 zeigt die X-Komponente der magnetischen Flußdichte bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt, die Y und Z-Komponente sind sehr klein. Die magnetischen Flußdichtevektoren liegen in den Tangenten des Kreisquerschnitts.

Im Bild 7.8 ist die Verteilung der magnetischen Kräfte dargestellt. Bild 7.9 zeigt die Verteilung der magnetischen Kräfte in der Y,Z-Ebene. Die Verteilung der magnetischen Kräfte ist symmetrisch zur Mitte des Kanals. Bild 7.10 zeigt die magnetischen Kräfte bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt. Die magnetischen Kräfte sind Zentripetalkräfte und nach der Z-Achse des Strombegrenzers gerichtet. Die magnetischen Kräfte in der Z-Achse sind Null.

Bild 7.4: Stromdichteverteilung \vec{j} Bild 7.5: Stromdichte bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt

Bild 7.6: Magnetische Flußdichtevertellung \vec{B} Bild 7.7: Magn. Flußdichte bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt

Bild 7.8: Magnetische Kräfteverteilung \vec{F} der ElementeBild 7.9: Magnetische Kräfteverteilung \vec{F} der Elemente

Bild 7.10: Magnetische Kräfte \vec{F} der Knoten

Kapitel 8

Fluidodynamikberechnung

Das Kapitel diskutiert die Fluidodynamikberechnung mit dem Element FLUID142. Das Element FLUID142 wird für die Berechnung einer 3D Geschwindigkeit in einer Aggregatzustand eingesetzt[50]. Die Voraussetzungen lauten:

1. Das Fluid ist newtonsch.
2. Es gibt nur einen Aggregatzustand.
3. Der Problembereich ändert sich nicht.

Ein Fluid, bei dem lineare Reibungsverhältnisse vorliegen, heißt Newtonsches Fluid [51].

Das Fluidodynamikproblem wird durch den Erhaltungssatz der Masse, des Impulses und der Energie definiert. Die Sätze werden durch die partiellen Differentialgleichungen dargestellt.

8.1 Die Kontinuitätsgleichung

Aus dem Erhaltungssatz der Masse erhält man die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (8.1)$$

mit

V_x, V_y, V_z Komponente von Geschwindigkeitsvektor

ρ Dichte

x, y, z globale kartesische Koordinaten

t Zeit

Außerdem

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (8.2)$$

mit

P Druck

Für inkompressible Flüssigkeit gilt als Vorgabewert $\frac{\partial \rho}{\partial P} = 10^{-15}$.

8.2 Die Impulsgleichung

In einer newtonschen Flüssigkeit ist die Beziehung zwischen der Spannung und der Verformungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit:

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij}\lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (8.3)$$

mit

τ_{ij} Spannungstensor

u_i orthogonale Geschwindigkeit ($u_1 = V_x, u_2 = V_y, u_3 = V_z$)

μ dynamische Viskosität

λ zweiter Koeffizient der Viskosität

Die Impulsgleichungen lauten:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} \\ + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &+ T_x \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} \\ + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &+ T_y \end{aligned} \quad (8.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} \\ + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &+ T_z \end{aligned} \quad (8.6)$$

mit

g_x, g_y, g_z Komponenten der Erdbeschleunigung

ρ Dichte

μ_e effektive Viskosität

R_x, R_y, R_z verteilte Widerstände

T_x, T_y, T_z Verlust durch Viskosität

T_x, T_y, T_z werden für inkompressible Flüssigkeit nicht betrachtet.

8.3 Die inkompressible Energiegleichung

Die Energiegleichung der inkompressiblen Flüssigkeit lautet

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x C_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y C_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z C_p T) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (8.7)$$

mit

C_p spezifische Wärmekapazität

T Temperatur

K Wärmeleitfähigkeit

Q_v Wärmequelle

8.4 Turbulenz

Wenn die Trägheitseffekte im Vergleich zu den Viskositätseffekten überwiegen, ist die Strömung meist turbulent.

Die ANSYS Software besitzt sechs Modelle zur Berechnung turbulenter Strömungen. Die sind: 'Standard k- ϵ ', 'Zero Equation Model', 'RNG-Re-normalized Group Model', 'NKE-New k- ϵ model due to Shih', 'GIR-Model due to Girimaji' und 'SZL-Shi, Zhu, Lumley Model'. 'Standard k- ϵ ' wird benutzt, um den Pinch-Effekt zu berechnen.

Die Lösung der turbulenten Gleichungen wird benutzt, um die effektive Viskosität und die effektive Wärmeleitfähigkeit zu berechnen.

8.5 Druck

ANSYS berechnet den relativen Druck. In Rotationskoordinate wird der relative Druck durch die folgende Gleichung wiedergegeben:

$$P_{abs} = P_{ref} + P_{rel} - \rho_0 \{g\} \cdot \{r\} + \frac{1}{2} \rho_0 (\{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\}) \cdot \{r\} \quad (8.8)$$

mit

ρ_0 Bezugsdichte

P_{abs} Druck

P_{ref} Bezugsdruck

P_{rel} relativer Druck

$\{g\}$ Vektor der Erdbeschleunigung

$\{r\}$ Ortsvektor des Fluidpartikel

$\{\omega\}$ Geschwindigkeitsvektor des Koordinatensystem

Der Bezugsdruck wird als Wert eingegeben.

Die Impulsgleichungen werden wie folgt dargestellt:

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\{V\}}{Dt} + 2\rho\{\omega\} \times \{V\} + \rho\{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\} \\ = \rho\{g\} - \nabla P_{abs} + \mu \nabla^2 \{V\} \end{aligned} \quad (8.9)$$

mit

$\{V\}$ Geschwindigkeitsvektor in Rotationskoordinate

μ Viskosität

ρ Dichte

Der negative Gradient des Drucks ist:

$$-\nabla P_{abs} = -\nabla P_{rel} - \rho_0\{g\} + \rho_0\{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\} \quad (8.10)$$

Die Gleichung 8.10 wird in die Impulsgleichung eingefügt, woraus die folgende Gleichung abgeleitet werden kann:

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\{V\}}{Dt} + 2\rho\{\omega\} \times \{V\} + (\rho - \rho_0)\{\omega\} \times \{\omega\} \times \{r\} \\ = (\rho - \rho_0)\{g\} - \nabla P_{rel} + \mu \nabla^2 \{V\} \end{aligned} \quad (8.11)$$

8.6 FLUID142 3D Fluid-thermisches Element

Man kann FLUID142 benutzen, um transiente und stationäre fluidthermische Systeme zu modellieren. Die Erhaltungsgleichungen für viskose Flüssigkeitsströmungen und die Energie werden im Fluidbereich gelöst. Nur die Energiegleichungen werden im nicht-flüssigen Bereich gelöst. Man kann das FLUID142 Element benutzen, um die Strömung und die Temperaturverteilung zu bestimmen.

Für das FLUID142-Element erhält man die Geschwindigkeit aus dem Prinzip der Impulserhaltung und den Druck aus dem Prinzip der Masseerhaltung. Die Temperatur erhält man bei Bedarf aus dem Energieerhaltungssatz.

Die Freiheitsgrade sind Geschwindigkeit, Druck und Temperatur.

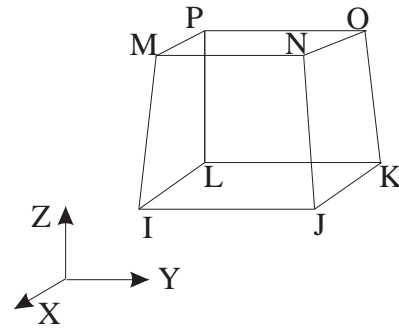


Bild 8.1: FLUID142

Das Bild 8.1 zeigt die Geometrie, Knotenstellen und das Koordinatensystem für das Element. Das Element wird durch 8 Knoten definiert.

Wenn die Materialnummer des FLUID142 1 ist, handelt es sich um ein Fluidelement. Man gibt seine Eigenschaften Dichte, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme ein. Es kann nur ein Fluid analysiert werden, und es muß ein definierter Aggregatzustand vorliegen. Die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme sind nur notwendig, wenn das Problem thermisch ist. Die Eigenschaften können eine Funktion der Temperatur sein.

Das Element muß ein Volumen größer als NULL besitzen. Es ist so zu definieren, daß die Normale, die durch die rechte Handregel mit den ersten vier Knoten verbunden ist, in das Element zeigt.

Man kann FLUID142 nicht mit anderen ANSYS-Elementen benutzen.

Der Problembereich und die Finite-Elemente dürfen sich während der Rechnung nicht verändern.

8.7 Fluidodynamikberechnung

In diesem Abschnitt wird eine transiente, 3D Fluidodynamik-Berechnung durchgeführt. Die Geometrie ist diejenige aus Bild 5.2.

8.7.1 Idealisierung

Das Magnetfeld übt Kräfte auf das Flüssigmetall aus. Die Richtungen der Kräfte wirken in das Innere des Flüssigmetalls. Die magnetische Kraftdichte werden auf die Knoten des Fluidelements übertragen. Der 3D Elementtyp FLUID142 wird verwendet, um die Fluidodynamik zu berechnen. Die Flußgeschwindigkeiten der Knoten werden berechnet, wobei sich die Knotenstellen nicht ändern.

Die folgende Voraussetzungen werden erfüllt:

Das Fluid ist newtonsch.

Es gibt nur den flüssigen Aggregatzustand.

Der Problembereich ändert sich nicht, d.h. die Knoten sind fest.

Das Flüssigmetall wird mit Hilfe des Elementes FLUID142 modelliert. Die Knotenstellen und die Elementaufteilung des Flüssigmetalls entsprechen somit der Magnetfeldberechnung. Bild 8.2 zeigt die Elementaufteilung des Flüssigmetalls.

Die Geschwindigkeiten, die den Knoten an den Wänden des Kanals und des Verdichterraumes zugeordnet sind, werden auf Null gesetzt. Auf Grund symmetrischer Verhältnisse werden die Z-Komponente der Geschwindigkeiten an den Knoten der Querschnittsflächen in der Mitte des Verdichterraumes auf Null gesetzt.

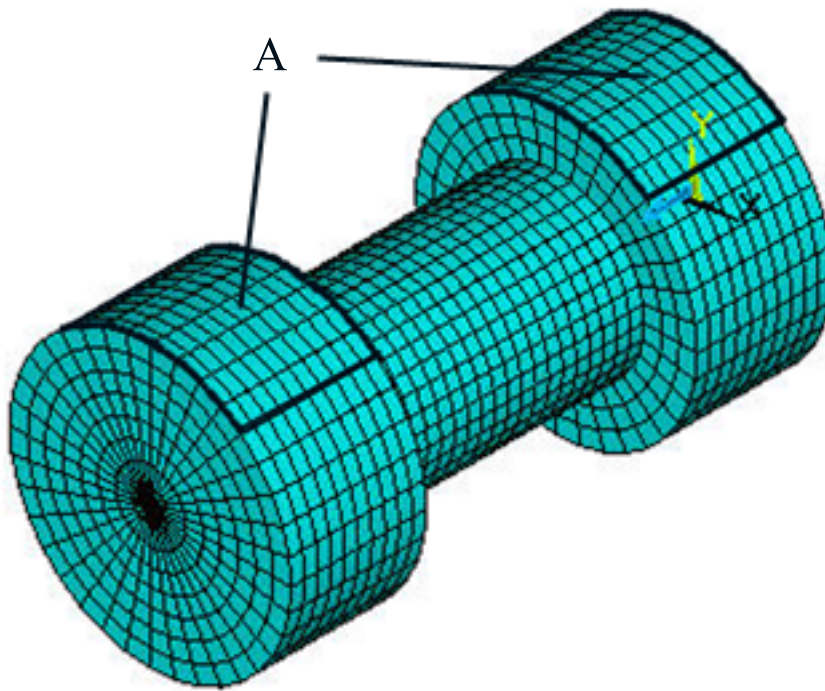


Bild 8.2: Elementaufteilung des Flüssigmetalls

Eine Methode zur Beschreibung der freien Oberfläche wurde im Abschnitt 7.3 'Volume of Fluid Method for Free Surface Flows' der 'ANSYS-Hilfe' veröffentlicht. Eine freie Oberfläche ist eine Grenzfläche zwischen einem Gas und einer Flüssigkeit. Die Differenz der Dichten zwischen dem Gas und der Flüssigkeit ist sehr groß. Wegen der niedrigen Dichte des Gases ist die Trägheit des Gases üblicherweise vernachlässigbar. Die einzige Wirkung des Gases besteht in der Druckwirkung auf die Grenzfläche. Der Gasbereich braucht deshalb nicht zu modellieren werden, und die freie Oberfläche wird als ein Rand mit konstantem Druck betrachtet [50].

Die Luft befindet sich auf dem Flüssigmetall im Verdichterraum. Die Fläche A im Bild 8.2 zeigt die freie Oberfläche. Nach der oben dargestellten Methode werden die Drücke der Knoten in der Fläche A mit 101350 Pa eingestellt. Die Fläche A soll waagrecht sein. Um die Programmierung zu vereinfachen, bleibt die Fläche A bogenförmig.

Die Turbulenz-Modellierung wird eingeschaltet. Die Einflüsse der Fallbeschleunigung, der Oberflächenspannung und der Anfangswerte des Drucks können von ANSYS-Software berücksichtigt werden.

8.7.2 Auswertung der Ergebnisse

Bild 8.3 zeigt das Strömungsfeld. Es stimmt mit dem Messungsergebnis überein [37]. Das Strömungsfeld ist turbulent. Das Flüssigmetall fließt vom Kanal nach dem Verdichterraum

entlang der Z-Achse und dann von der Z-Achse nach den Wänden des Verdichterraums entlang der Ebene von $Z=0$. Danach fließt das Flüssigmetall nach der Diaphragma entlang den Wänden des Verdichterraums und nach Z-Achse entlang dem Diaphragma.

Bild 8.4 zeigt das Strömungsfeld in der Y,Z-Ebene. Bild 8.5 zeigt die Geschwindigkeit des Flüssigmetalls bei $X=0$ im B-B'-Querschnitt. Bild 8.6 zeigt die Geschwindigkeit des Flüssigmetalls bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt. Bild 8.7 zeigt die Geschwindigkeit des Flüssigmetalls an der Z-Achse. Bild 8.5 zeigt, daß Y-Komponenten der Geschwindigkeit im Gebiet von $Y>0$ negativ sind. D.h., das Flüssigmetall im B-B'-Querschnitt im oberen halben Verdichterraum fließt gegen die Richtung der Y-Achse. Dies begünstigt die Luftbewegung in den Kanal. Bild 8.7 zeigt, daß Z-Komponenten der Geschwindigkeit an der Z-Achse negativ sind. D.h., das Flüssigmetall an der Z-Achse fließt gegen die Richtung der Z-Achse und vom Kanal nach dem Verdichterraum. Die Geschwindigkeit im D-D'-Querschnitt ist niedrig. 100% im Bild 8.7 entspricht der Hälfte der Länge des im Bild 5.2 gezeigten Modells in der Z-Richtung.

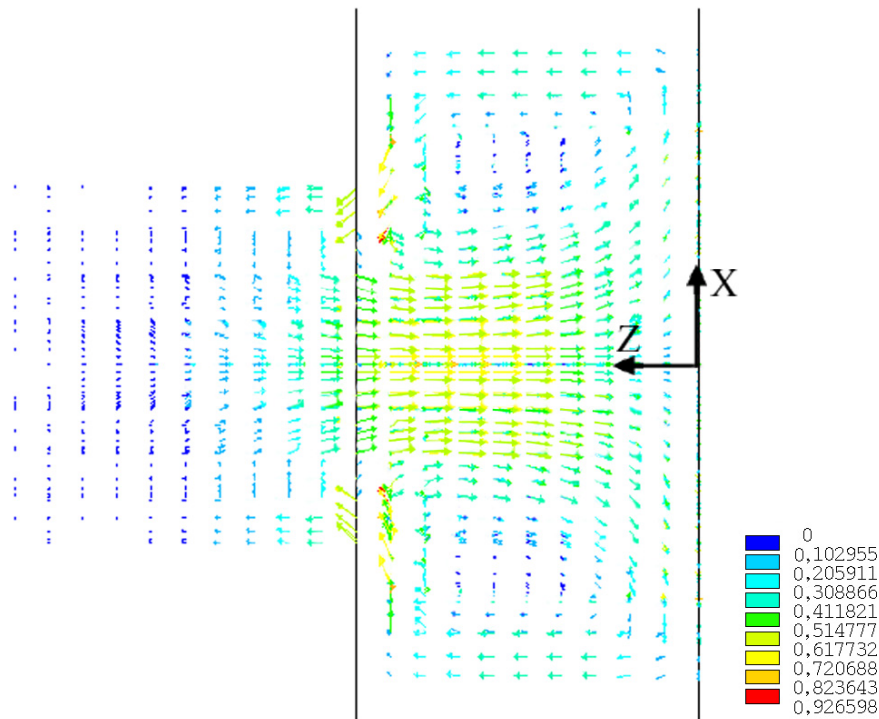


Bild 8.3: Geschwindigkeitsverteilung \vec{v}

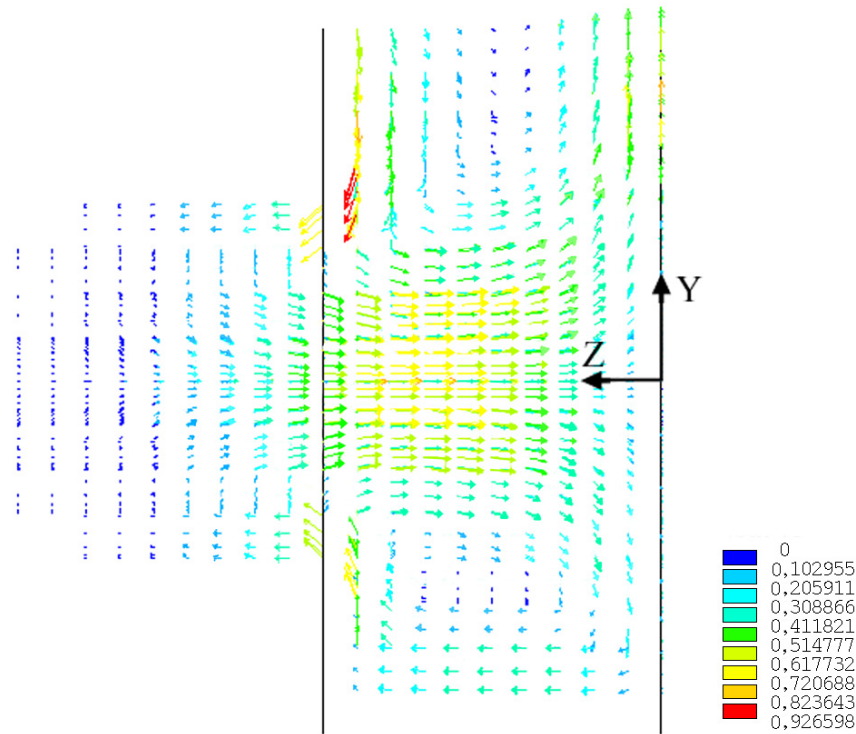


Bild 8.4: Geschwindigkeitsverteilung \vec{v}

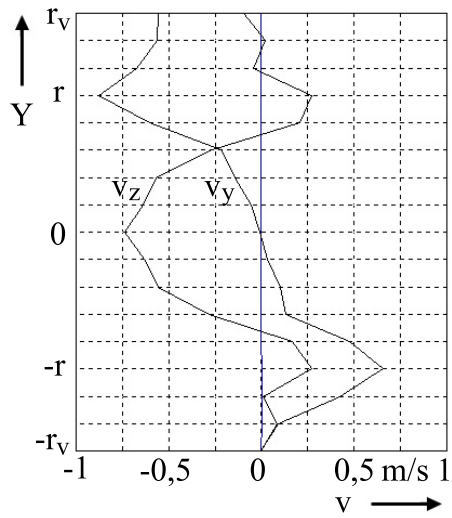


Bild 8.5: Geschwindigkeit bei $X=0$ im B-B'-Querschnitt

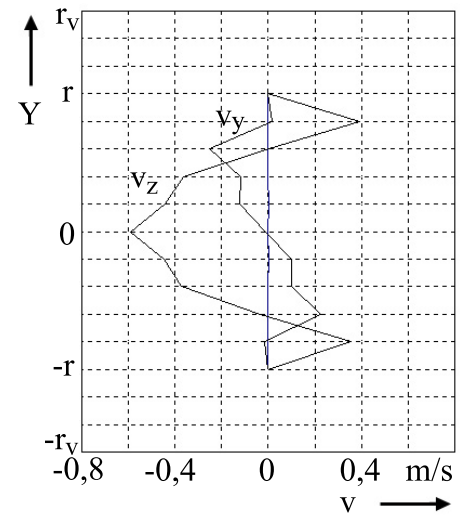


Bild 8.6: Geschwindigkeit bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt

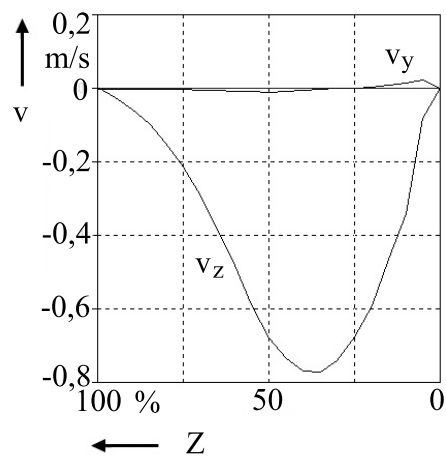


Bild 8.7: Geschwindigkeit an der Z-Achse

Kapitel 9

Pinch-Effekt-Berechnung

9.1 Idealisierung

Die Berechnung des Pinch-Effekts erfolgt iterativ unter der Verwendung experimentell ermittelter, also gemessener Strom-Zeitverläufe [37]. Dabei wird bei jedem Iterationsschritt eine neue Analyse des Magnetfeldes und der Fluidodynamik durchgeführt. Der Problembe-
reich und die Geometrie ändern sich während der Analyse innerhalb eines jeden einzelnen Schrittes nicht.

Für jede Iterationsstufe wird das Magnetfeld berechnet, um die magnetischen Kräfte-
dichten auf den jeweiligen Knoten zu bestimmen. Die magnetischen Kräftedichten werden
auf das Strömungsfeld übertragen. Dann wird die Fluidodynamik berechnet, um die Ge-
schwindigkeit der Knoten zu erhalten. Wenn $t > t_P$, werden die neuen Knotenstellen mit
APDL-Kommandos von ANSYS nach der Berechnung des Magnetfeldes und der Fluid-
dynamik bestimmt, um neue Knoten und Elemente zu erzeugen.

Der Berechnungsablauf erfolgt gemäß folgender vier Schritte:

1. Berechnung der Knotenstellen
2. Erzeugung der Knoten und Elemente des Flüssigmetallteils, des Isolator-
teils und des Luftteils, Berechnung des transienten Magnetfelds
3. Erzeugung der Knoten und Elemente des Flüssigmetallteils und Berechnung des tran-
sienten Pinch-Effekts
4. Iteration der o.g. drei Schritte wenn $t > t_P$, sonst Iteration ohne Schritt 1.

Die im Bild 5.2 dargestellte Geometrie wird benutzt, um den Pinch-Effekt des Flüssig-
metallstrombegrenzers zu simulieren. Der Radius und die Länge des Kanals entsprechen
den Abmessungen des originalen Strombegrenzers.

Der Pinch-Effekt wird mit dem Element SOLID97, INFIN111 und FLUID142 be-
rechnet. Aus dem Element SOLID97 wird die magnetische Kraftdichte an das Element
FLUID142 übergeben. Die Magnetfeldberechnung und die Fluidodynamikberechnung wur-
den bereits in Kapitel 7 und 8 dargestellt.

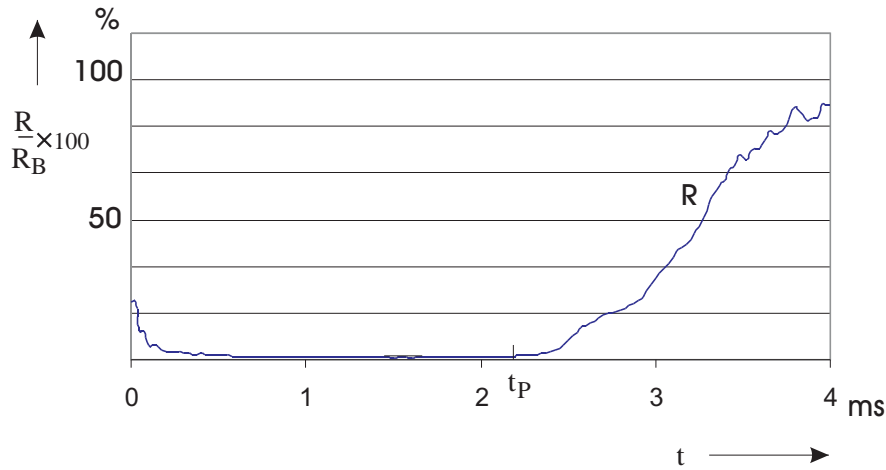


Bild 9.1: Zeitliche Widerstandsänderung des Strombegrenzers

Bild 9.1 zeigt die zeitliche Widerstandsänderung des Strombegrenzers. Die Widerstandskurve wurde aus experimentell ermittelte Daten aus Bild 6.4 in [37] abgeleitet. Vor dem Zeitpunkt t_p ist der Widerstand konstant. D.h. vor dem Zeitpunkt t_p ändert sich die Querschnittsfläche des Kanals nicht, der Kanal ist mit Flüssigmetall gefüllt und es befindet sich keine Luft im Kanal. Um den Vorgang vor dem Zeitpunkt t_p zu simulieren, werden die Geschwindigkeiten der Knoten an den Wänden auf Null gesetzt. Weil der Luftbewegungsvorgang vor dem Zeitpunkt t_p kaum auf den Widerstand des Strombegrenzers wirkt, wird dieser Luftbewegungsvorgang nicht simuliert.

Ab den Zeitpunkt t_p steigt der Widerstand. D.h., ab diesem Zeitpunkt t_p strömt Luft in den Kanal. Nach der in 'ANSYS-Hilfe' dargestellten Methode werden die Flächen B und C im Bild 9.2 als freie Oberflächen mit dem Druck 101350 Pa gezeichnet. Die Fläche B ist der Weg der Luftströmung, und die Fläche C zeigt die Luft im Kanal. Andere Knoten an den Wänden sind fest und die Geschwindigkeiten der Knoten sind Null.

Außerdem werden die Einflüsse der Fallbeschleunigung, der Oberflächenspannung und der Anfangswerte des Drucks berücksichtigt.

Das Programm zur Pinch-Effekt-Berechnung besitzt eine Steuerdatei und 3 Macrodateien. Die Macrodatei `fmknoten.mac` berechnet die Knotenstellen am Anfang, wogegen die Macrodatei `fmmag.mac` das Magnetfeld, und die Macrodatei `fmcfd.mac` die Fluidodynamik berechnet. Das Programm wird im Anhang dieser Arbeit erklärt.

9.2 Auswertung der Ergebnisse

Drei typische Variationen werden berechnet. Bild 9.3 zeigt die halben Ströme aus drei Versuchen [37]. Bild 9.4 zeigt die Stromdichte. Die Stromdichte im Kanal ist größer als die

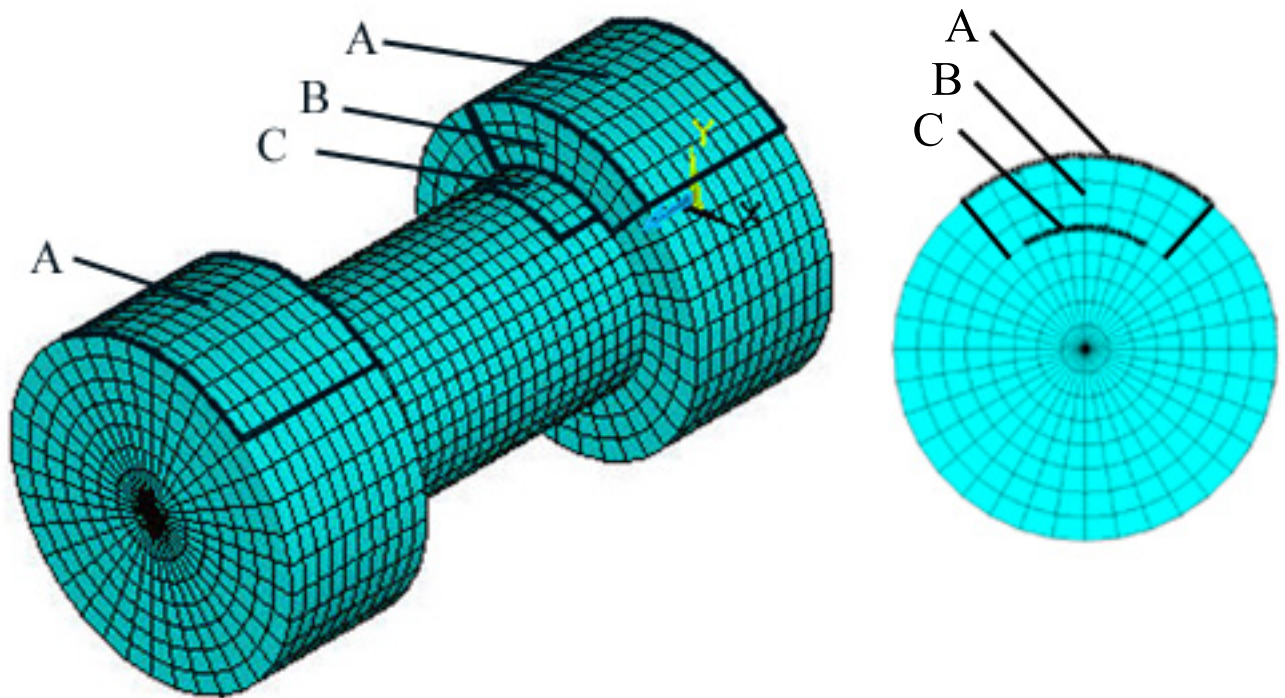


Bild 9.2: Freie Oberfläche für Pinch-Effekt-Berechnung

im Verdichterraum. Die Auswirkung der Bewegung des Flüssigmetalls auf die Stromdichte wurde vernachlässigt.

Bild 9.5 zeigt die magnetische Kräfteverteilung. Die Richtungen der magnetischen Kräfte der Knoten an der Diaphragmenwand zeigen von der Wand weg. Die magnetischen Kräfte anderer Knoten sind nach der Achse des Zylinders gerichtet.

Bild 9.6 zeigt die Strömungsfeld. Die Fläche C bewegt sich nach unten, die Luft fließt in den Kanal und das Flüssigmetall fließt aus dem Kanal. Die Turbulenz im oberen halben Verdichterraum ist vorteilhaft für die Luftbewegung in den Kanal. Bild 9.7 zeigt die Y-Komponente der Geschwindigkeiten bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt bei Zeitpunkt von 0,7, 1, 1,2 und 1,3 ms nach Kurzschlußbeginn der Variation 1. Bild 9.8 zeigt die Z-Komponente der Geschwindigkeiten bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt. Bild 9.9 zeigt die Y-Komponente der Geschwindigkeiten an der Z-Achse. Bild 9.10 zeigt die Z-Komponente der Geschwindigkeiten an der Z-Achse. Die Geschwindigkeiten steigen mit der Stromerhöhung an.

Bild 9.11 zeigt die Elementänderung. Im Vergleich zum Bild 9.2 erfährt die Fläche C eine erkennbare Änderung.

Bild 9.12 zeigt die Amplituden der Geschwindigkeit des Knotens K im Bild 9.5. Die Richtung der Geschwindigkeit zeigt nach unten. Vor dem Zeitpunkt t_p , ist die Geschwindigkeit gleich Null.

Ab dem Zeitpunkt t_p strömt Luft in den Kanal. Wegen der Unterdruckwirkung steigt die Amplitude der Geschwindigkeit vom Knoten K schnell an. Der Radius von Knoten K nimmt schnell ab. Bild 9.12 zeigt den Radiusverlauf. Das bedeutet, dass der Pinch-Effekt vor dem maximalen auftretendem Strom entsteht.

Der Unterdruck wird mit $p_u = 101350 - p$ definiert. p ist der kleinste Druck im Kanal. Die Simulationsergebnisse von p_u stimmen mit den Messergebnisse überein [37]. Der Unterdruck steigt an, weil die magnetischen Kraftdichten ansteigen. Die Luft fließt wegen der Unterdruckwirkung in Richtung des Kanals.

Die Stromverläufe der drei Variationen haben große Unterschiede. Der Zeitpunkt t_p der drei Variationen weist ebenfalls große Unterschiede auf. Je schneller der Strom ansteigt, desto kürzer ist die Zeit t_p . Aber $p_u(t_p) * \int_0^{t_p} i dt$ weist kleine Unterschiede auf. Der Durchschnittswert wird als K_p bezeichnet. $K_p = 230000 \text{ Pa} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$. Diese Eigenschaft wird im nächsten Kapitel für die Festlegung der Parameter des Widerstands-Modell des Strombegrenzers benutzt.

Bild 9.13 zeigt die Verläufe von $p_u * \int_0^t i dt$. Der Zeitpunkt t_p ist ungefähr 1, 1,75 und 3,1 ms für Variation 1, 2 und 3. Wenn $p_u * \int_0^t i dt = 230000 \text{ Pa} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$ ist, ist die Zeit $t = 0,99, 1,73$ und $3,2 \text{ ms}$ für Variation 1, 2 und 3. Man kann deshalb annehmen, dass $p_u(t_p) * \int_0^{t_p} i dt$ konstant für verschiedene Kurzschlußströme i ist. t_p ist die Zeit vom Kurzschlußbeginn bis zum Lufteintritt in den Kanal. $p_u(t_p) * \int_0^{t_p} i dt = K_p$ bedeutet, dass t_p abhängig von der Stromamplitude und der Steigung des Stroms ist.

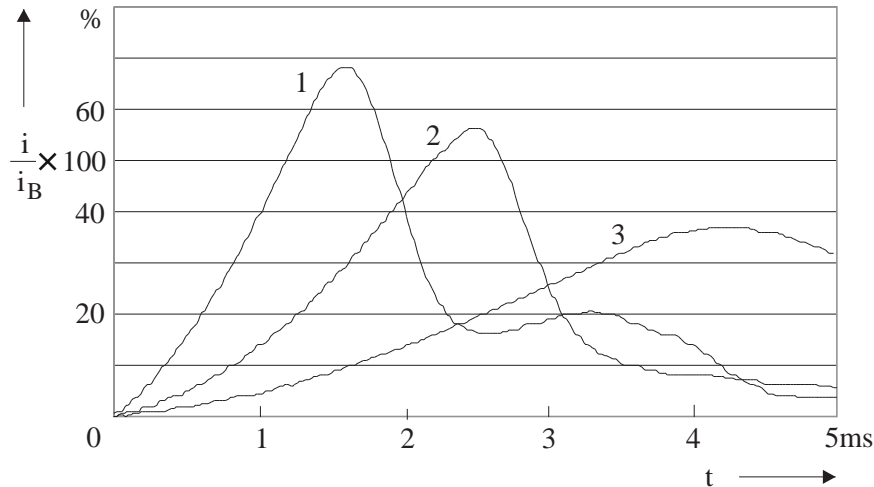
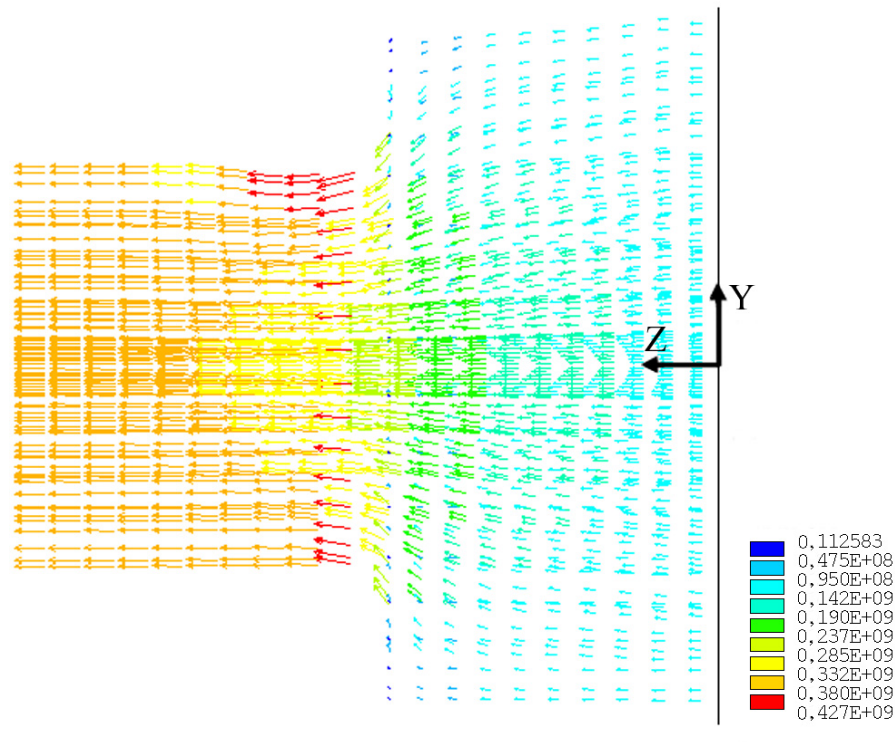
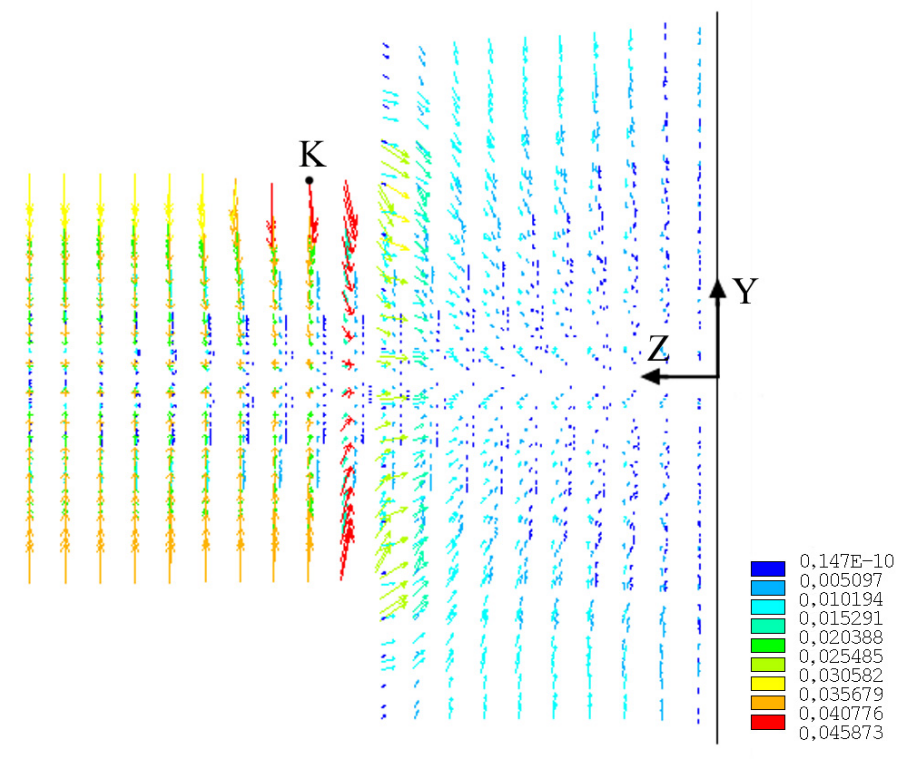
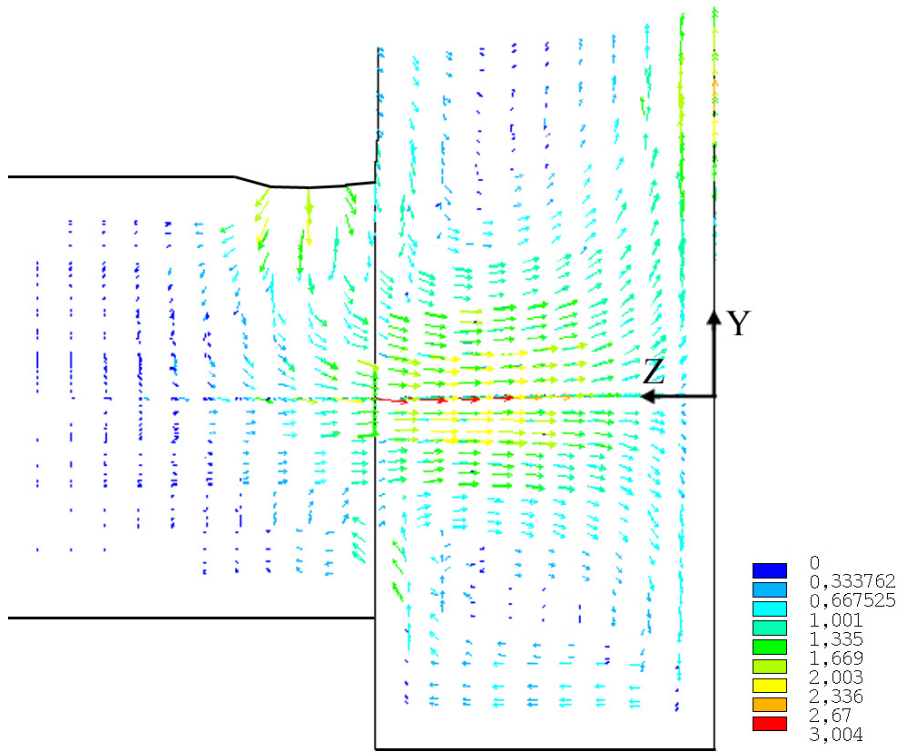
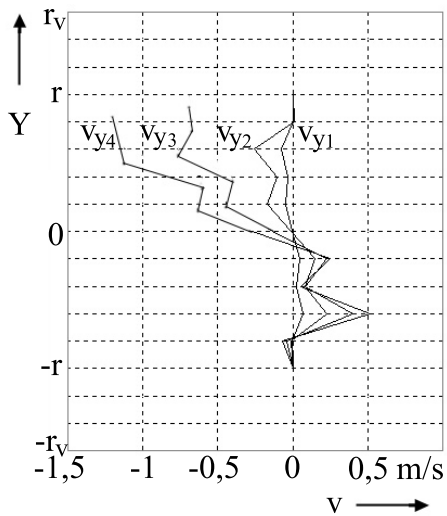
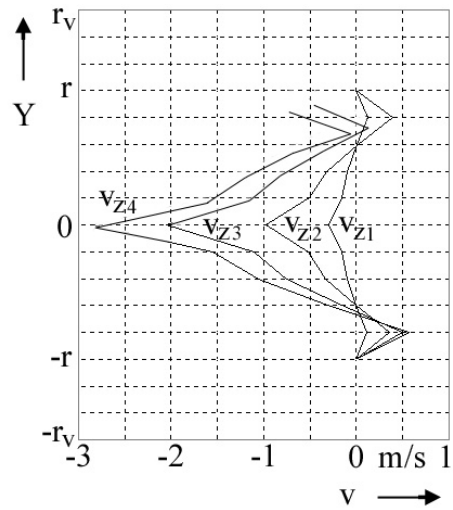


Bild 9.3: Kurzschlußstromverläufe

Bild 9.4: Stromdichteverteilung \vec{j} des KurzschlußstromsBild 9.5: Magnetische Kräfteverteilung \vec{F} bei Pinch-Effekt

Bild 9.6: Geschwindigkeitsverteilung \vec{v} bei Pinch-EffektBild 9.7: Y-Komponente der Geschwindigkeiten bei $X=0$ im C-C'-QuerschnittBild 9.8: Z-Komponente der Geschwindigkeiten bei $X=0$ im C-C'-Querschnitt

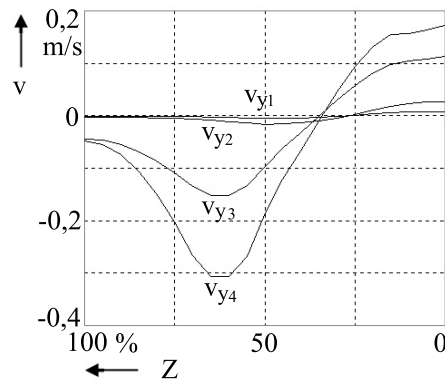


Bild 9.9: Y-Komponente der Geschwindigkeiten an der Z-Achse

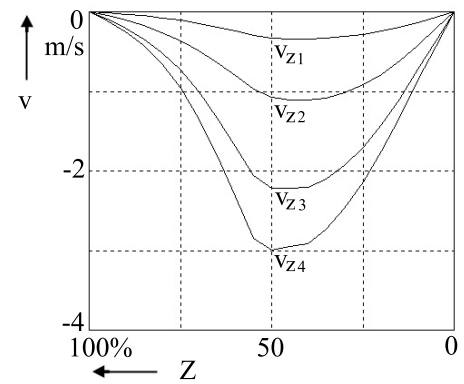


Bild 9.10: Z-Komponente der Geschwindigkeiten an der Z-Achse

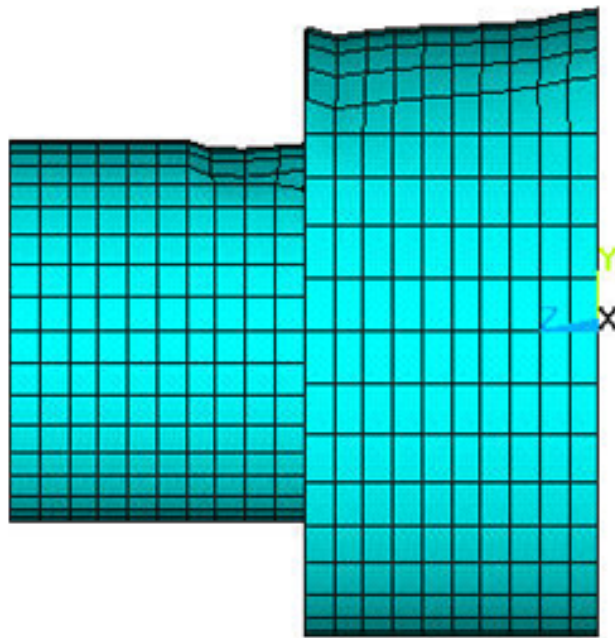


Bild 9.11: Elementänderung bei Pinch-Effekt

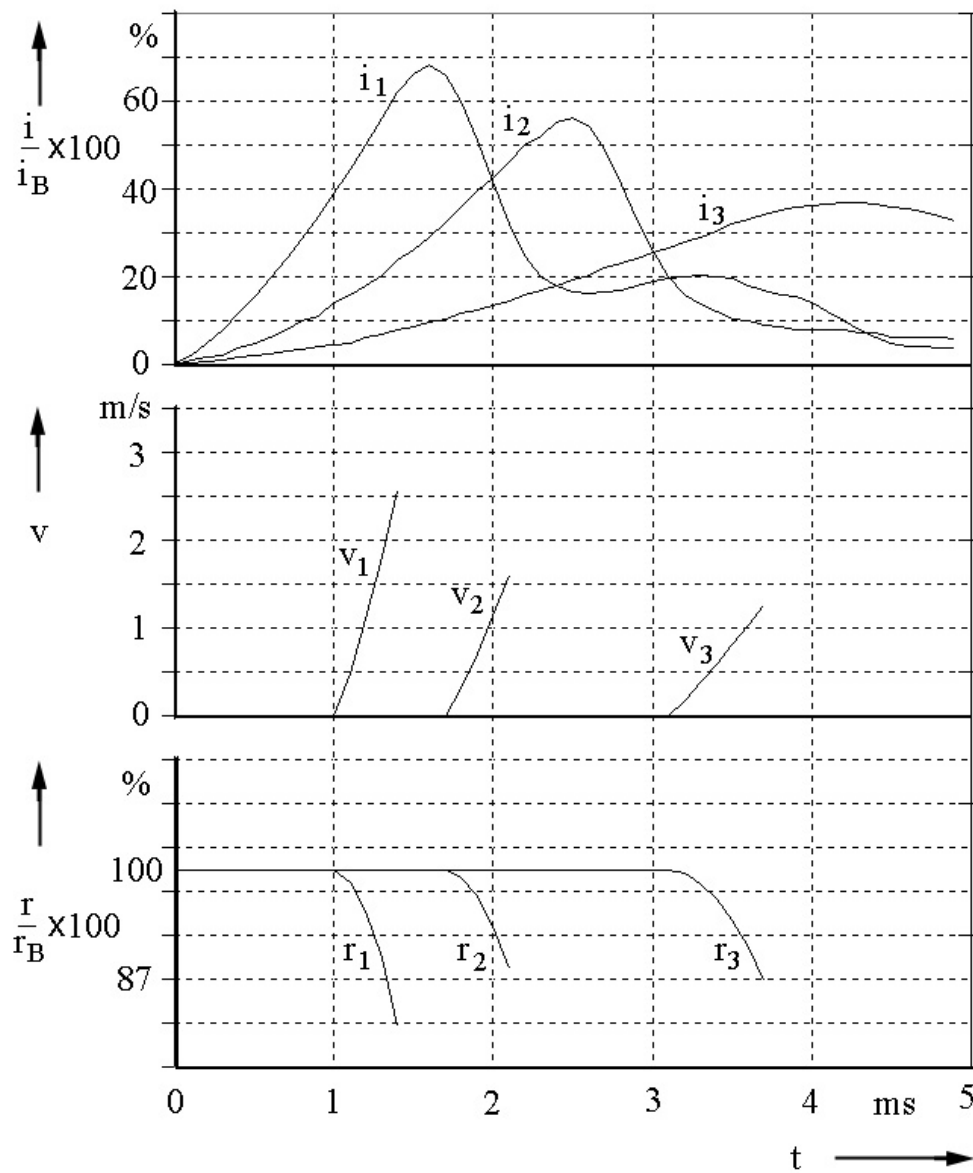
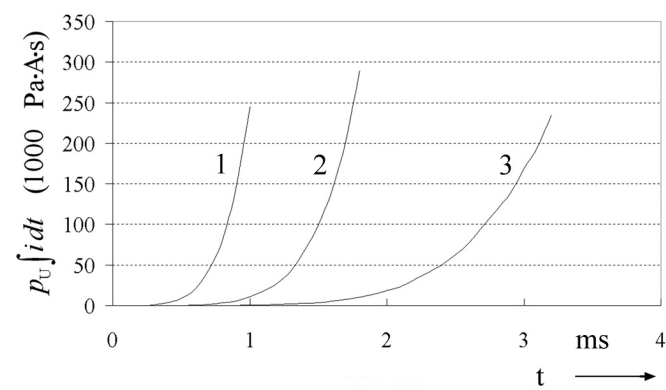


Bild 9.12: Geschwindigkeitsverläufe am Punkt K im Bild 9.5

Bild 9.13: Verläufe von $p_U * \int_0^t i dt$

Kapitel 10

Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers

10.1 Widerstands-Modell

Bild 10.1 zeigt das Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers. Ab dem Zeitpunkt t_A steigt der Widerstand an. Zum Zeitpunkt t_{im} fließt der maximale Kurzschlußstrom. Für t_{um} besitzt der Spannungsabfall über dem Flüssigmetallstrombegrenzer den maximalen Wert.

Die Wechselwirkung des Flüssigmetallstrombegrenzers mit dem elektrischen Netz kann durch das im Bild 10.1 gezeigte Modell simuliert werden. Wenn $t \leq t_A$, wird der Begrenzer durch einen konstanten Widerstand R_0 , wenn $t_A < t \leq t_{im}$, durch eine Gerade und wenn $t_{im} < t \leq t_{um}$, wird der Begrenzer durch eine Gerade mit einem größeren Anstieg beschrieben. Wenn $t > t_{um}$, ändert sich der Widerstand nicht mehr.

Das Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers mit zwei Kanälen wird mathematisch folgendermaßen beschrieben:

$$R(t) = \begin{cases} R_0 & t \leq t_A \\ \frac{R_{im}-R_0}{t_{im}-t_A}(t - t_A) + R_0 & t_A < t \leq t_{im} \\ \frac{R_{um}-R_{im}}{t_{um}-t_{im}}(t - t_{im}) + R_{im} & t_{im} < t \leq t_{um} \\ R_{um} & t > t_{um} \end{cases} \quad (10.1)$$

mit

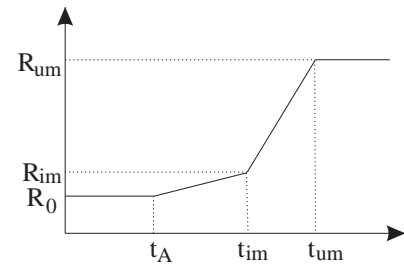


Bild 10.1: Nichtlineares Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers

R_0 Widerstand bei normalem Betrieb

R_{im} Widerstand bei maximalem Kurzschlußstrom

R_{um} Widerstand bei maximalem Spannungsabfall über dem Flüssigmetallstrombegrenzer

Die Widerstände R_0 , R_{im} und R_{um} können aus Experimentdaten bestimmt werden.

i_g ist der gesamte Strom des Flüssigmetallstrombegrenzers mit zwei Kanäle. $i_g^2(t_A) * \int_0^{t_A} i_g dt$ von verschiedene Kurzschlußströme haben kleine Unterschiede. Der Durchschnittswert wird als K_A definiert. Die Berechnung der $i_g^2 * \int_0^t i_g dt$ beginnt mit dem Eintreten des Kurzschlusses. Wenn $i_g^2 * \int_0^t i_g dt = K_A [A^3s]$, $t = t_A$.

Die Kennlinien $t_A - t_{im}$ und $t_{im} - t_{um}$ werden aus Experimentdaten abgeleitet [37]. Bild 10.2 und 10.3 zeigen die zwei Kennlinien. Es sind lineare Funktionen und können durch die folgenden Gleichungen beschrieben werden.

$$t_{im} = 1,1994t_A + 0,000415 \quad s \quad (10.2)$$

$$t_{um} = 1,3459t_{im} - 0,0001443 \quad s \quad (10.3)$$

mit

t_{im} Zeit bei maximalem Strom

t_{um} Zeit bei maximalem Spannungsabfall des Begrenzers

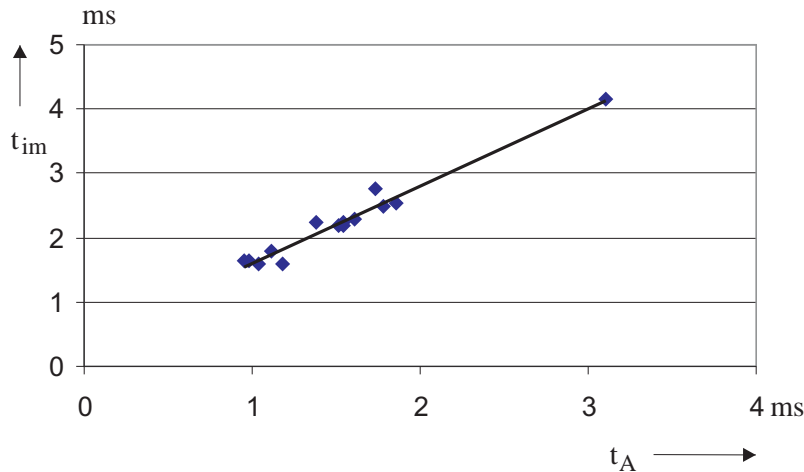
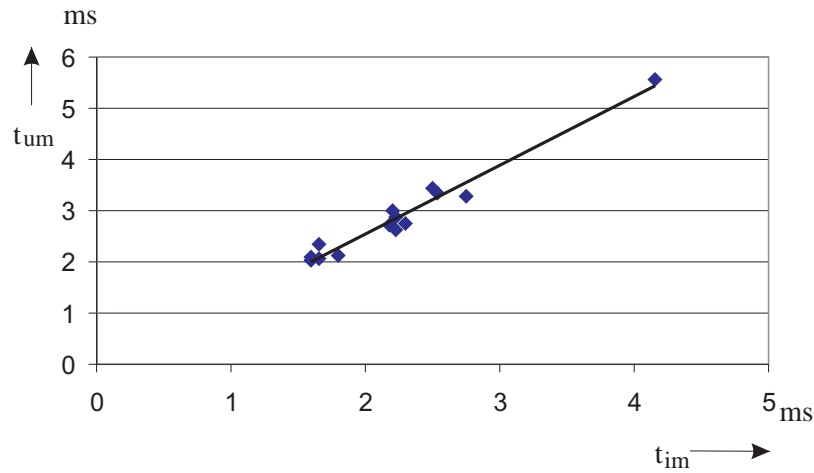


Bild 10.2: t_A - t_{im} Kennlinie

10.2 Auswertung des Modells

Die Schaltung aus Bild 10.4 wurde für die Simulation benutzt. Es gilt $u = \sqrt{2}U_{sin}(\omega t + \Psi_u)$.

Bild 10.3: t_{im} - t_{um} Kennlinie

Die Widerstände des Modells wurden aufgrund vorhandener Experimentdaten festgelegt. K_A ist $1,7 \times 10^9$ [A³s].

Die Berechnung der $i_g^2 * \int_0^t i_g dt$ beginnt mit dem Eintreten des Kurzschlusses. Wenn $i_g^2 * \int_0^t i_g dt < K_A$, ist der Widerstand des Begrenzers R_0 . Wenn $i_g^2 * \int_0^t i_g dt = K_A$, $t = t_A$. Dann werden die Zeitpunkte t_{im} und t_{um} nach 10.2 und 10.3 berechnet. Wenn $t_A < t \leq t_{im}$, wird der Widerstand des Begrenzers nach der Gerade mit dem Anstieg $\frac{R_{im}-R_0}{t_{im}-t_A}$ berechnet. Wenn $t_{im} < t \leq t_{um}$, wird der Widerstand des Begrenzers nach der Geraden mit dem Anstieg $\frac{R_{um}-R_{im}}{t_{um}-t_{im}}$ berechnet. Wenn $t > t_{um}$, ist der Widerstand R_{um} .

Die Ergebnisse der Simulationen werden in den Bildern 10.5, 10.6 und 10.7 gezeigt. Die Kurve i_v gibt den gemessenen Strom wieder [37]. Die Kurve i_s zeigt den Simulationsstrom. Der Simulationsfehler des maximalen Stroms von Rechnung 1 liegt unter 2,3%. Der Simulationsfehler des maximalen Stroms von Rechnung 2 liegt unter 1%. Der Simulationsfehler des maximalen Stroms von Rechnung 3 liegt unter 1%. Der maximale Simulationsfehler des maximalen Stroms von 15 Versuche ist 35%. Die Simulationsfehler des maximalen Stroms sind überwiegend kleiner als 10%.

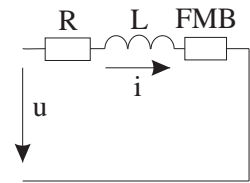


Bild 10.4: Schaltung für Simulation

Das Modell kann den Strombegrenzungsvorgang des Flüssigmetallstrombegrenzers bis t_{um} gut simulieren.

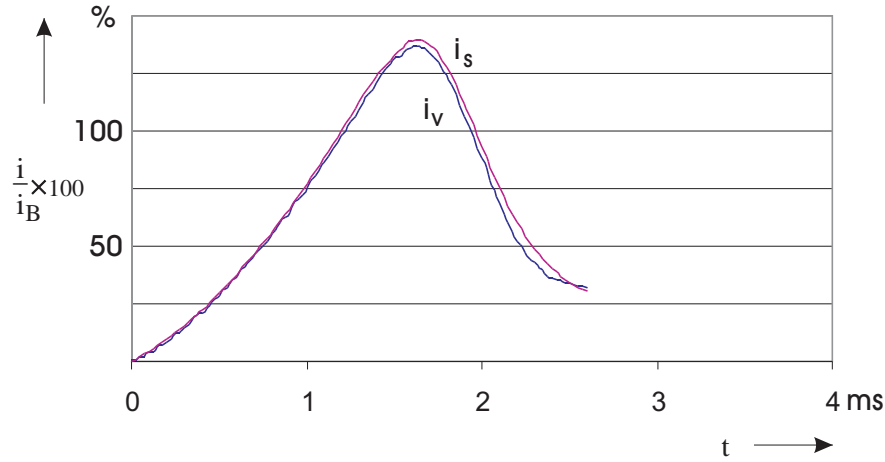


Bild 10.5: Gemessener Strom und Simulationsergebnis der Rechnung 1

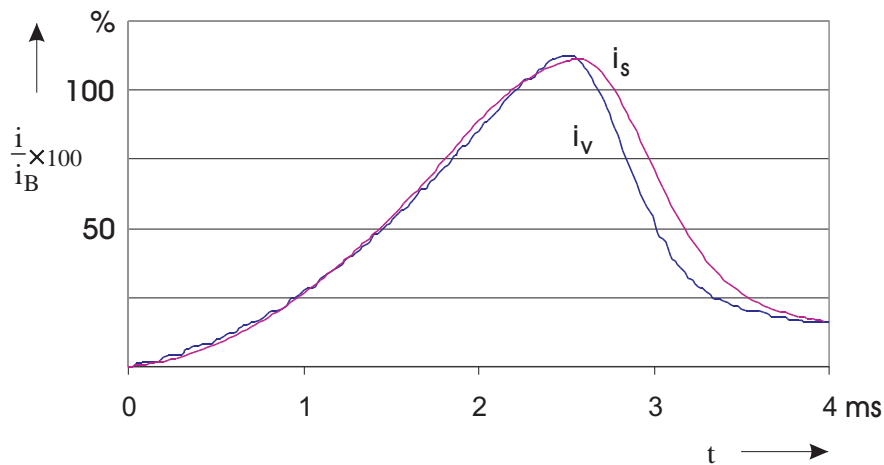


Bild 10.6: Gemessener Strom und Simulationsergebnis der Rechnung 2

10.3 Parameter des Modells für andere Radien des Kanals

Um die Kurzschlußströme im Elektroenergieversorgungssystem, das einen Flüssigmetallstrombegrenzer mit zwei Kanälen und mit anderen Radien des Kanals enthält, ohne Feldberechnung abschätzen zu können, muß man R_0 , R_{im} , R_{um} , K_A , t_{im} und t_{um} bestimmen.

Unter Berücksichtigung der experimentellen Daten (siehe Bild 10.1) und unter der Annahme, dass sich die Widerstände umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche von zwei Kanälen verhalten gilt.

$$R_0 = \frac{A}{a} \times 10^{-3} \quad (10.4)$$

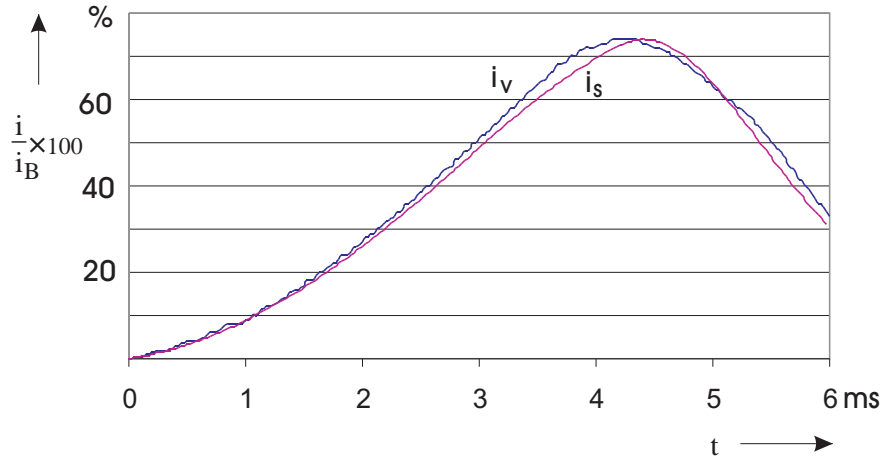


Bild 10.7: Gemessener Strom und Simulationsergebnis der Rechnung 3

$$R_{im} = \frac{A}{a} \times 10^{-2} \quad (10.5)$$

$$R_{um} = 0,07 \frac{A}{a} \quad (10.6)$$

mit

a Querschnittsfläche des Kanals m^2

A Bezugsquerschnittsfläche m^2

Es wird angenommen, dass die Gleichungen 10.2 und 10.3 auch für Flüssigmetallstrombegrenzer mit anderen Abmessungen (Radius) gelten.

Die Gleichung für die Berechnung von K_A kann durch Druckfeldberechnung abgeleitet werden. K_p ist meistens von der Differenz zwischen der Höhe des Flüssigmetalls im Verdichterraum und im Kanal abhängig. Eine Annahme ist, dass die Differenz zwischen den Höhen von Flüssigmetall im Verdichterraum und im Kanal gleich ist, wie die des Beispiels, d.h., $K_p = 230000$. Bei der Berechnung des Druckfeldes des Flüssigmetallstrombegrenzers mit anderem Radius wird $p_U * \int_0^t i dt$ berechnet. Wenn $p_U * \int_0^t i dt = 230000$, $t = t_p$. Dann kann man $K_A = i_g^2(t_p) * \int_0^{t_p} i_g dt$ berechnen. Die Druckfelder wurden für drei verschiedene Radien des Kanals berechnet. Auf diese Weise erhält man die Gleichung für die Berechnung von K_A .

$$K_A = 9,3 \times 10^{11} [A^3 s/m] r [m] - 1,3 \times 10^9 [A^3 s] \quad (10.7)$$

mit

r Radius des Kanals m

Die Gleichung gilt dafür, dass $\int_0^t i_g dt > 4,6$ bei $i_g^2 * \int_0^t i_g dt = K_A$.

Kapitel 11

Anwendung des Flüssigmetallstrombegrenzers

11.1 Begrenzungseigenschaft

Die Bilder 11.1, 11.2 und 11.3 zeigen die Begrenzungseigenschaft aus 3 Versuchen. Die Kurven i_k stellen die Berechnungsergebnisse des Kurzschlußstroms ohne Begrenzer dar. Die Kurven i_v zeigen die Versuchsströme mit Begrenzer [37].

Der Stoßkurzschlußstrom von der im Bild 11.1 gezeigten Rechnung 1 hat einen Wert von 1308 % des Bezugsstroms. Der gemessene Maximalwert diesbezüglich beträgt 136 % des Bezugsstroms [53]. Der Begrenzungsfaktor ist $136/1308 = 0,104$.

Der Stoßkurzschlußstrom von der im Bild 11.2 gezeigten Rechnung 2 hat einen Wert von 708 % des Bezugsstroms. Der gemessene Maximalwert diesbezüglich beträgt 112 % des Bezugsstroms. Der Begrenzungsfaktor ist 0,158.

Der Stoßkurzschlußstrom von der im Bild 11.3 gezeigten Rechnung 3 hat einen Wert von 150 % des Bezugsstroms. Die gemessenen Maximalwerte betragen 74 % des Bezugsstroms. Der Begrenzungsfaktor ist 0,493. Je größer der Stoßkurzschlußstrom ist, desto kleiner ist der Begrenzungsfaktor.

Bild 11.4 zeigt die Beziehung zwischen den gemessenen Maximalstromwerten und den Zeiten der gemessenen Maximalströme. Je größer der gemessene Maximalstrom ist, desto kleiner ist die Zeit. Auf Grund dieser Eigenschaft kann man den Flüssigmetallstrombegrenzer für die Kurzschlußstrombegrenzung benutzen.

11.2 Begrenzung und Selektivität

Der Abschnitt diskutiert die Begrenzung und die Selektivität des Flüssigmetallstrombegrenzers an einem Beispiel. Bild 11.5 zeigt den entsprechenden Netzschaltplan. Die Parameter des Netzes sind $S''_{kN} = 350\text{MVA}$, $R_N = 0,0000503\Omega$ und $X_N = 0,0005003\Omega$.

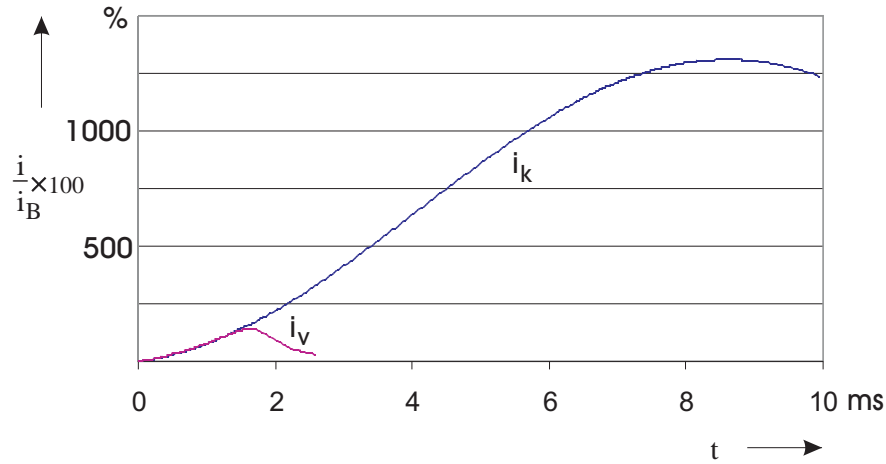


Bild 11.1: Begrenzungseigenschaft 1: Kurzschlußstrom i_k ohne Begrenzer; Kurzschlußstrom i_v mit Begrenzer

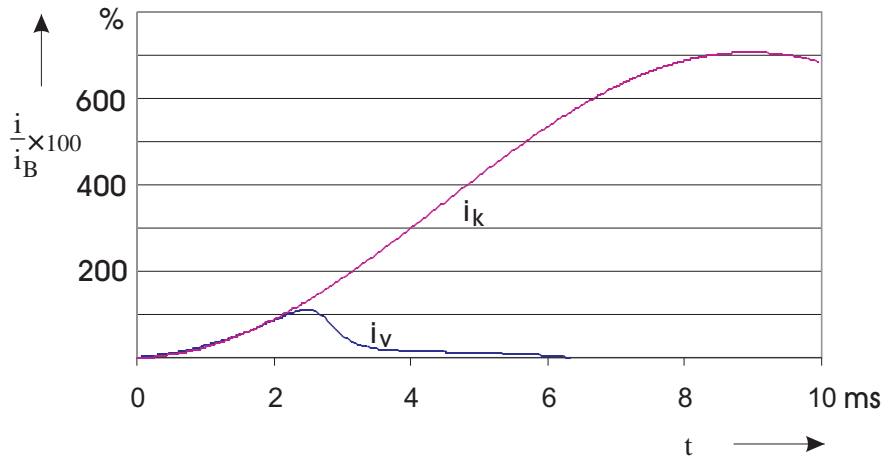


Bild 11.2: Begrenzungseigenschaft 2: Kurzschlußstrom i_k ohne Begrenzer; Kurzschlußstrom i_v mit Begrenzer

Die Parameter des Transformators sind $S''_{rT} = 2500\text{kVA}$, $R_T = 0,00068\Omega$ und $X_T = 0,00378\Omega$. Die Parameter der Kabel L_1 sind NAYY-J 240 mm², $R'_L = 0,131\Omega/\text{km}$ und $X'_L = 0,079\Omega/\text{km}$. Die Kabel L_1 sind 100 m lang. Die Parameter der Kabel L_2 sind NAYY-J 150 mm², $R'_L = 0,208\Omega/\text{km}$ und $X'_L = 0,080\Omega/\text{km}$. Die Kabel L_2 sind 100 m lang.

Die Kurve i_k im Bild 11.6 stellt den Kurzschlußstrom an der Kurzschlußstelle C ohne Flüssigmetallstrombegrenzer dar. Die Kurve i_s im Bild 11.6 stellt die Simulation des Kurzschlusses an der Kurzschlußstelle C mit Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_C dar. Die

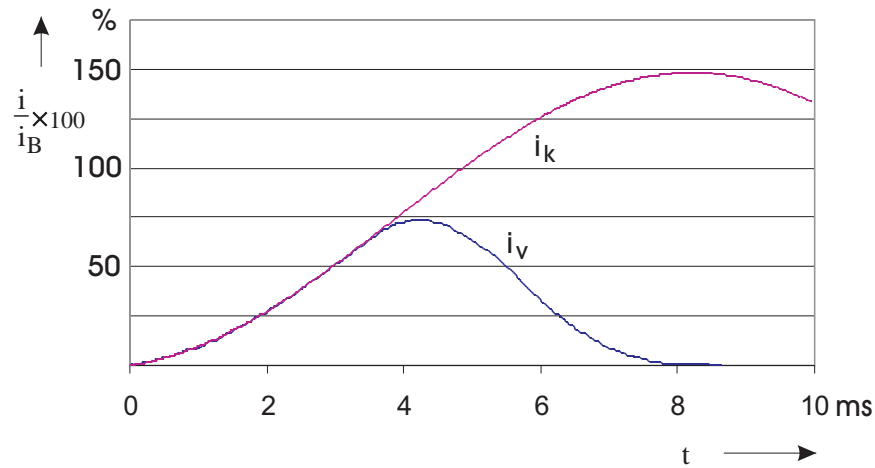


Bild 11.3: Begrenzungseigenschaft 3: Kurzschlußstrom i_k ohne Begrenzer; Kurzschlußstrom i_v mit Begrenzer

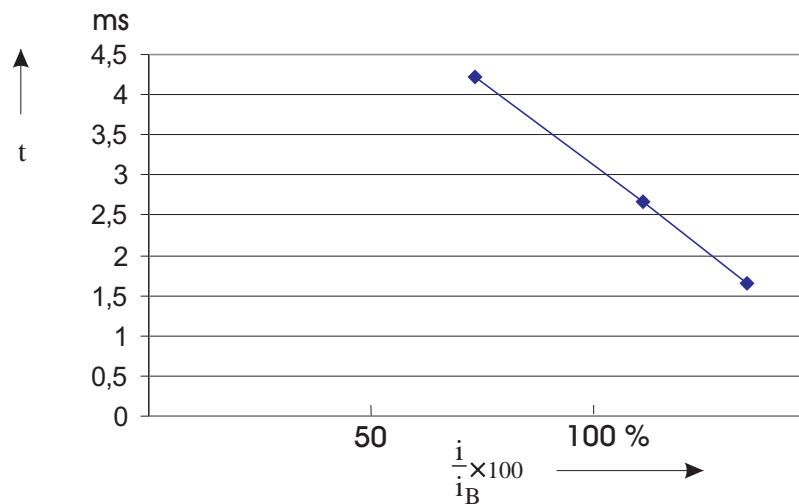


Bild 11.4: Gemessene Maximalstromwerte und Zeiten der gemessenen Maximalströme

Querschnittsfläche von zwei Kanälen des Begrenzers beträgt $12 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Der Begrenzungsfaktor ist 0,435.

Die Kurve i_k im Bild 11.7 stellt den Kurzschlußstrom an der Kurzschlußstelle B ohne Flüssigmetallstrombegrenzer dar. Die Kurve i_s im Bild 11.7 stellt die Simulation des Kurzschlusses an der Kurzschlußstelle B mit Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_B dar. Die Querschnittsfläche von 2 Kanälen des Begrenzers beträgt $30 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Der Begrenzungsfaktor ist 0,39.

Die Kurve i_k im Bild 11.8 stellt den Kurzschlußstrom an der Kurzschlußstelle A oh-

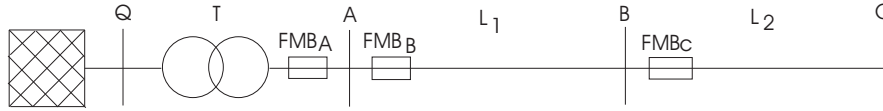


Bild 11.5: Netzschaltplan für Anwendung des Flüssigmetallstrombegrenzers

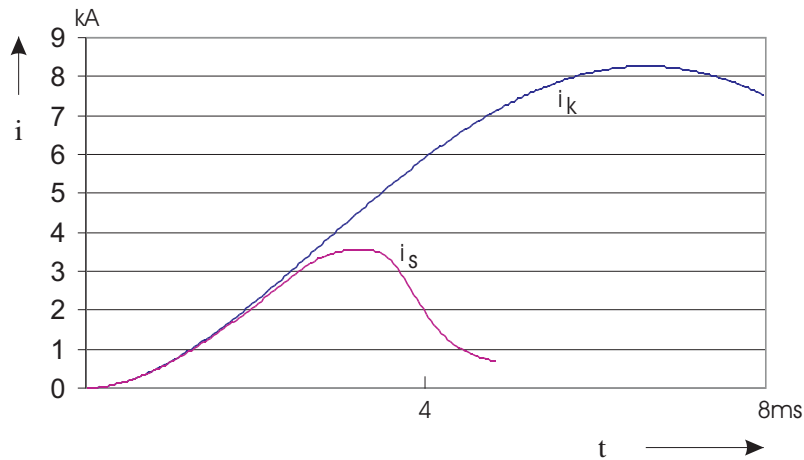


Bild 11.6: Begrenzungseigenschaft an der Stelle C

ne Flüssigmetallstrombegrenzer dar. Die Kurve i_s im Bild 11.8 stellt die Simulation des Kurzschlusses an der Kurzschlußstelle A mit Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_A dar. Die Querschnittsfläche von 2 Kanälen des Begrenzers beträgt $98 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Der Begrenzungsfaktor ist 0,275.

Die Kurve i_s im Bild 11.9 stellt die Simulation des Kurzschlusses am Anfang der Kabel L_2 mit Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_C dar. FMB_C begrenzt den Strom. Der maximale Stromwert beträgt 4430 A. Wenn der Strom durch den Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_B fließt, begrenzt dieser den Strom nicht. Es gibt die Selektivität zwischen dem Begrenzer FMB_B und dem Begrenzer FMB_C .

Die Kurve i_s im Bild 11.10 stellt die Simulation des Kurzschlusses am Anfang der Kabel L_1 mit Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_B dar. FMB_B begrenzt den Strom. Der maximale Stromwert beträgt 10528 A. Wenn der Strom durch den Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_A fließt, begrenzt dieser FMB_A den Strom nicht. Es existiert Selektivität zwischen dem Begrenzer FMB_A und dem Begrenzer FMB_B .

Der Flüssigmetallstrombegrenzer kann den Kurzschlußstrom selektiv begrenzen.

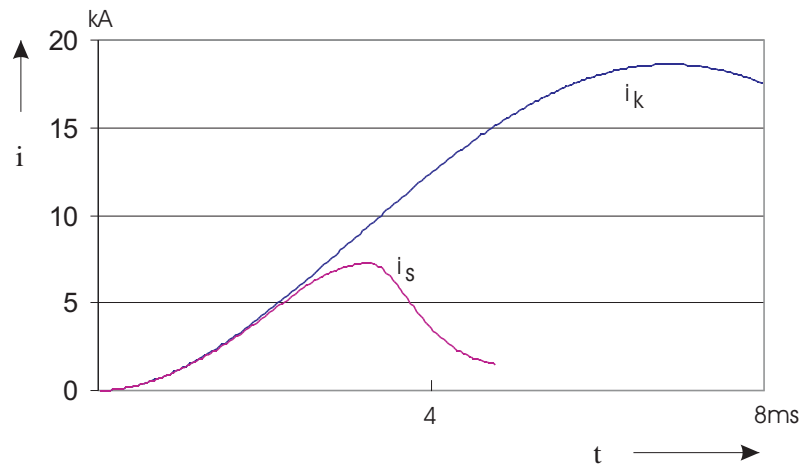


Bild 11.7: Begrenzungseigenschaft an der Stelle B

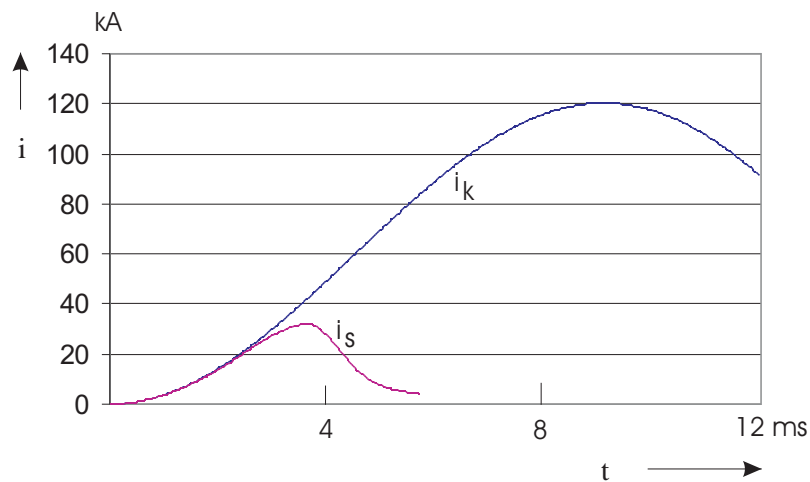
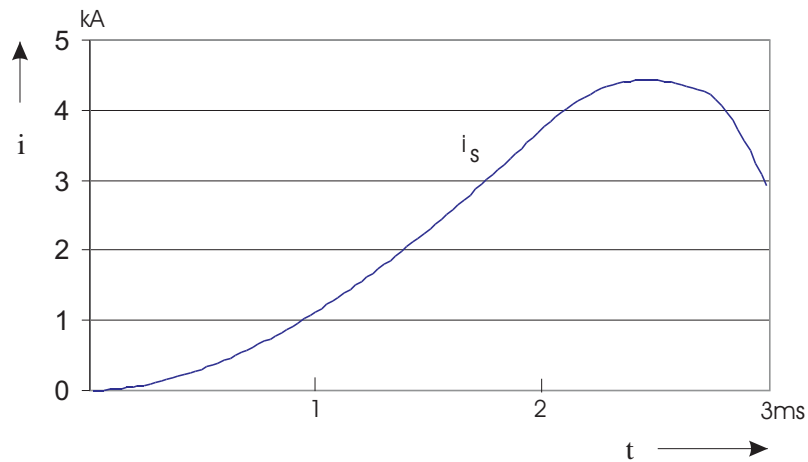
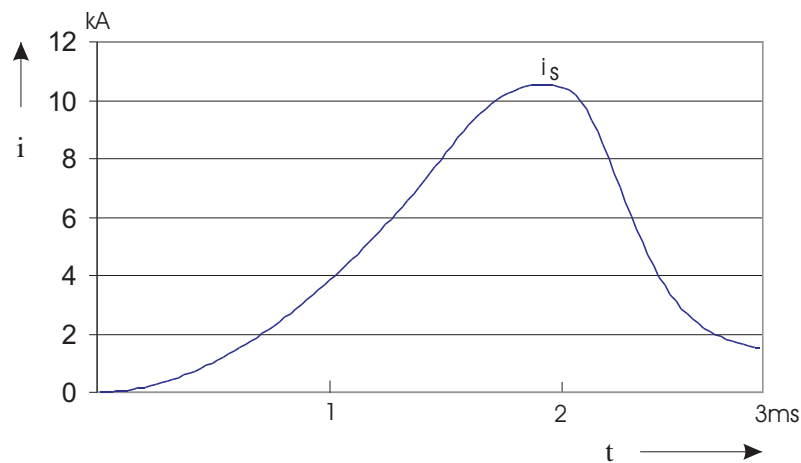


Bild 11.8: Begrenzungseigenschaft an der Stelle A

11.3 Anzahl der Diaphragmen

Das Bild 11.11 zeigt die gemessenen Ströme zweier Strombegrenzer mit verschiedenen Diaphragmen [37]. Die Kurve i_2 im Bild 11.11 stellt den Strom des Begrenzers mit N Diaphragmen dar. Die Kurve i_1 im Bild 11.11 stellt den Strom des Begrenzers mit $N/2$ Diaphragmen dar. Die Maximalwerte von 2 Strömen sind dabei fast identisch.

Das Bild 11.12 zeigt die Widerstände zweier Strombegrenzer. R_B ist der Bezugswiderstand [53]. Die Widerstände R_{im} der zwei Strombegrenzer sind fast identisch. Die Widerstände R_0 und R_{um} des Strombegrenzers mit $N/2$ Diaphragmen sind nahezu halb so groß, wie die Widerstände R_0 und R_{um} des Strombegrenzers mit N Diaphragmen.

Bild 11.9: Selektivitätsanalyse zwischen dem FMB_B und dem FMB_CBild 11.10: Selektivitätsanalyse zwischen dem FMB_A und dem FMB_B

11.4 Leistungsverlust

Der spezifische Widerstand von GaInSn ist fast 10-fach so groß wie der von Aluminium. Zudem besitzt der Kanal des Begrenzers kleine Querschnitte. Deshalb ist der Widerstand des Begrenzers bei normalem Betrieb relativ groß.

Wenn die Fläche von zwei Kanälen vom Begrenzer FMB_C im Bild 11.5 12 mm^2 ist, beträgt der Leistungsverlust 211 W.

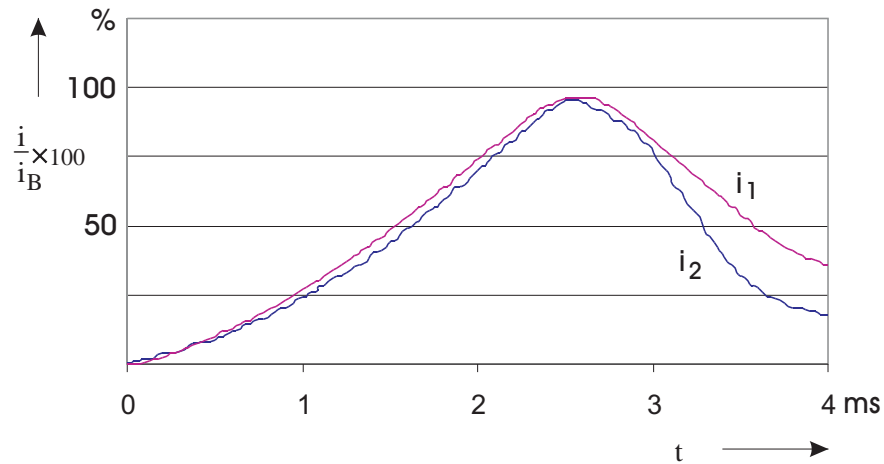


Bild 11.11: Diaphragmenwirkung

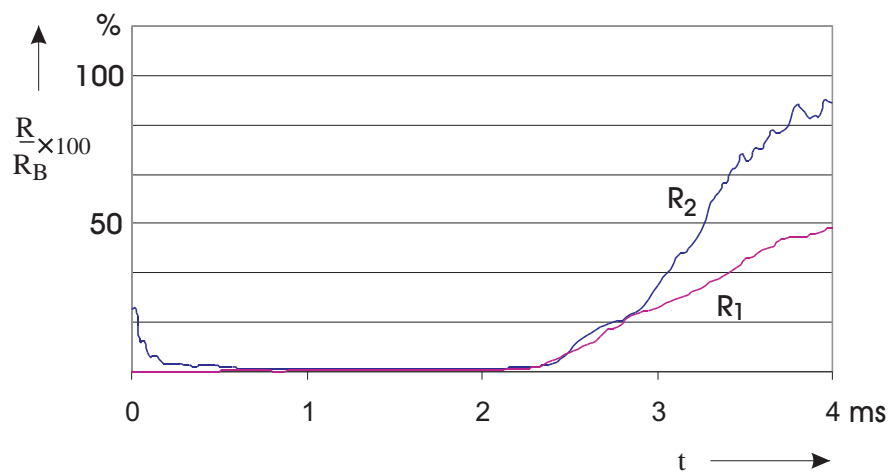


Bild 11.12: Widerstände des Strombegrenzers mit verschiedenen Diaphragmen

Wenn die Fläche von zwei Kanälen vom Begrenzer F_{MBB} 30 mm^2 ist, beträgt der Leistungsverlust 152 W .

11.5 Strombegrenzer und Störlichtbogenkurzschluß

Die Störlichtbogenspannung im Niederspannungsnetz ist stochastisch. In der Literatur[13] findet sich hierfür eine Formel, um die Störlichtbogenspannung zu simulieren. Je länger der Störlichtbogen ist, desto höher ist die Störlichtbogenspannung. Die Strombegrenzungsfaktoren des Störlichtbogens liegen auf der 400 V -Spannungsebene zwischen $0,35$ und $0,99$. Je länger der Störlichtbogen ist, desto kleiner ist der Faktor.

Die Kurve i_{LB} im Bild 11.13 zeigt den einpoligen Störlichtbogenkurzschlußstrom ohne Flüssigmetallstrombegrenzer. Der Kurzschluß entsteht am Stelle B mit 150 V Störlichtbogenspannung. Der Maximalwert ist 8,972 kA. Die Kurve i_s im Bild 11.13 zeigt den Störlichtbogenkurzschlußstrom mit Flüssigmetallstrombegrenzer FMB_B . Der Maximalwert beträgt 5,47 kA.

Die Kurve i_{LB} im Bild 11.14 zeigt den einpoligen Störlichtbogenkurzschlußstrom ohne Flüssigmetallstrombegrenzer. Der Kurzschluß entsteht am Anfang der Kabel L_1 mit 150 V Lichtbogenspannung. Die Maximalwerte sind 49,7 kA. Die Kurve i_s im Bild 11.14 zeigt den Störlichtbogenkurzschlußstrom mit Flüssigmetallstrombegrenzer. Der Maximalwert ist 8,79 kA.

Die o.g. Beispiele zeigen, dass der Flüssigmetallstrombegrenzer bei Störlichtbogenkurzschluß strombegrenzend wirkt.

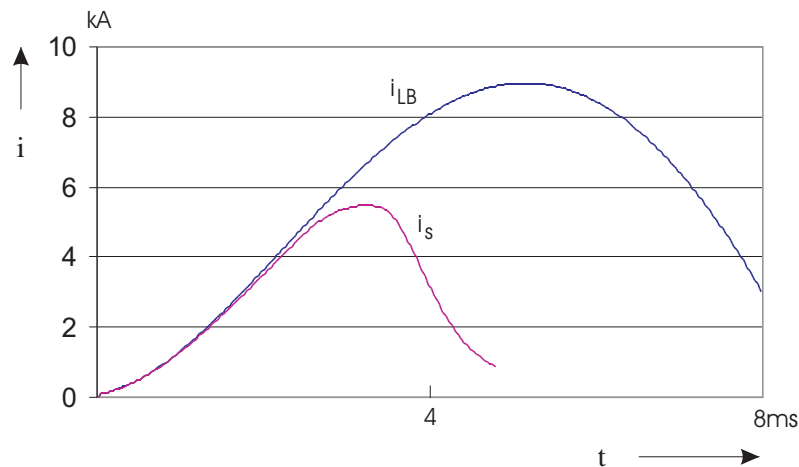


Bild 11.13: Strombegrenzungswirkung an der Stelle B

11.6 Einsatz

Weil der Flüssigmetallstrombegrenzer Strombegrenzungswirkung und Selektivität besitzt sowie eine maximale Belastbarkeit der Leitung von 363 A im Niederspannungsnetz vorliegt, kann der Begrenzer für die Begrenzung des Kurzschlußstroms in der Leitung genutzt werden.

Der Begrenzer kann auch im Zweig eines Motors zum Einsatz kommen. Es dauert weniger als 10 ms vom Pinch-Effekt bis zu Entstehung des Lichtbogens. Der Begrenzer kann nur einen Kurzschlußstrom begrenzen, der größer als der Anlaufstrom ist.

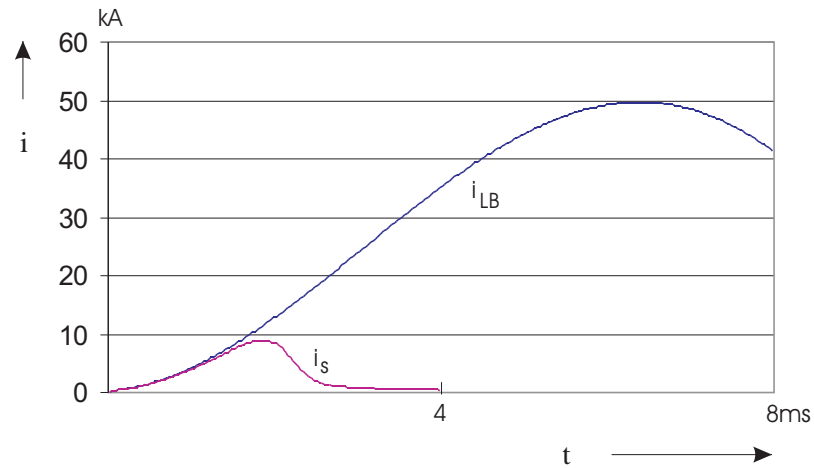


Bild 11.14: Strombegrenzungswirkung an der Stelle A

Zum Minimieren des Leistungsverlustes können folgende Vorschläge unterbreitet werden:

1. Weniger Diaphragmen: Der Widerstand R_0 steht im direkten Verhältnis zu der Anzahl der Diaphragmen. Aber der Begrenzer mit $N/2$ Diaphragmen hat in etwa die gleiche Strombegrenzungswirkung wie jener mit N Diaphragmen. Um die ideale Anzahl der Diaphragmen zu bestimmen, muß man den Begrenzer mit weniger Diaphragmen untersuchen und die Kennlinie der Begrenzungswirkung ermitteln.
2. Bessere Struktur: z. B. Herabsetzen der Kanallänge.

Kapitel 12

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teile. Der erste Komplex befasst sich mit der Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen im Elektroenergieversorgungssystem. Der zweite Teil hat die Simulation von Flüssigmetallstrombegrenzern zum Inhalt.

Die wesentlichen und bestimmenden Betriebsmittel in Energieversorgungssystemen innerhalb der Erzeuger- und Abnehmerpunkte sind Netzeinspeisungen, Leitungen und Kabel, Transformatoren, Filter, Kondensatoren und Drosseln, sowie Synchron- und Asynchronmaschinen. Die mathematischen Modelle der Betriebsmittel wurden analysiert. Bezüglich der Drehstromasynchronmaschine wurde ein mathematisches Modell analysiert. Die Ständerströme /-spannungen des Modells sind Wechselströme /-spannungen. Das Modell kann deshalb mit dem Wechselstrommodell anderer Betriebsmittel im Differentialgleichungssystem verbunden werden. Die Koeffizienten der Ständergleichungen sind konstant, was zu vergleichsweise kleinen Rechenzeiten bei der Lösung der Systemgleichungen führt.

Um die Vorgänge in elektrischen Netzen unter Berücksichtigung auftretender Lichtbogenkurzschlüsse im Niederspannungsnetz beschreiben zu können, war die Ableitung eines mathematischen Modells für den dreipoligen Lichtbogen erforderlich. Das in der Arbeit beschriebene Modell beschreibt die logische Beziehung zwischen Lichtbogenspannungen und Leiterströmen. Es bietet zudem die Möglichkeit der Berechnung der minimalen dreipoligen Lichtbogenkurzschlußströme.

In der Arbeit wurde ein Algorithmus abgeleitet, der es erlaubt, das Differentialgleichungssystem von beliebigen Strukturen elektrischer Netze aufzustellen. Der Algorithmus basiert auf der Orientierungsnetzgraphtheorie und beinhaltet die Formulierung des Normalbaumes, der Schnittmatrix und der Zustandsgleichungen. In diesem Zusammenhang sei bemerkt, dass die Zustandsvariablenmethode hinsichtlich der Simulation bei sich zeitlich ändernden Netzen ein vorteilhaftes Verfahren darstellt.

Die rechentechnische Umsetzung der benannten Modelle erfolgte mittels eines umfangreichen Programms in der Programmiersprache VC++. Es ermöglicht die Berechnung so-

wohl von metallischen Kurzschlüssen als auch von Lichtbogenkurzschlüssen in Energieversorgungssystemen, die aus den oben genannten Betriebsmitteln bestehen. Die Ergebnisse, die das Programm liefert, wurden mit den Ergebnissen eines Programms auf der Basis von MATLAB und der analytische Lösung verglichen. Der Vergleich hat ergeben, dass das neu entwickelte VC++ Programm eine vergleichsweise gute Genauigkeit aufweist.

Hinsichtlich der Berechnung des 3D Pinch-Effekt in Flüssigmetallstrombegrenzern wurde ein Rechenprogramm mit der Software ANSYS erstellt. Das Rechenprogramm basiert auf einem physikalischen Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers, wobei gilt:

- Es ist Multifeldproblem.
- Der Kurzschlußstrom steigt schnell.
- Der Flüssigmetallstrombegrenzer besitzt keine Axialsymmetrie.
- Die Wirkung der Kanalwände wird berücksichtigt.

Die magnetische Kräftedichte wurde berechnet und auf die Knoten der Fluidelemente übertragen. Der transiente Kurzschlußstrom ändert sich mit der Zeit. Deshalb wird die Berechnung des Pinch-Effekts iterativ ausgeführt. Die unsymmetrische Geometrie und die Wände des Kanals wurden berücksichtigt.

Für den Flüssigmetallstrombegrenzer wurde ein mathematische Modell für Netzrechnung entwickelt. Dieses besteht aus vier Geraden mit verschiedenen Richtungskoeffizienten. Die Parameter des Modells wurden nach der Druckberechnung und den Experimentdaten bestimmt. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Simulation des Flüssigmetallstrombegrenzers und den experimentell ermittelten ergibt, dass sich das Modell zur Simulation von Flüssigmetallstrombegrenzern eignet.

Die Strombegrenzung, die Selektivität und der Leistungsverlust des Flüssigmetallstrombegrenzers wurden analysiert. Nachteilig sind die relativ großen Leistungsverluste des Begrenzers unter normalen Betriebsbedingungen des Netzes. Die Wirkungen der Geometrie auf den Pinch-Effekt wurden ebenfalls analysiert.

Im Hinblick auf weiterführende Arbeiten zum vorliegenden Thema wird empfohlen, das Modell für dreipoligen Lichtbögen auch auf ein-/zweipolige Lichtbögen zu erweitern.

Die Finite-Element-Methode zur Berechnung des 3D Pinch-Effekts mit ANSYS kann noch verbessert werden, um den vollständigen Vorgang des Pinch-Effekts berechnen zu können. Um die Leistungsverluste von Flüssigmetallstrombegrenzer zu minimieren, empfiehlt es sich, die Anzahl der Diaphragmen und deren Dicke so gering wie möglich zu halten.

Formelzeichen

Kapitel 1 bis 4

Vektorgrößen und Matrix sind fett gedruckt, skalare Größen in Normalschrift.

Formelzeichen	Einheit	Benennung
C	F	Kapazität
d	mm	Abstand der Elektroden, zwischen denen der Lichtbogen auftritt
e	V	Spannungsquelle
E		Einheitsmatrix
g	S	Momentanleitwert des Lichtbogen
G	S	stationärer Leitwert des Lichtbogen
i	A	Strom
i	A	Strom
I		Inzidenzmatrix
L	H	Selbstinduktivität
L	H	Selbstinduktivität
M	H	Gegeninduktivität
M	H	Gegeninduktivität
M		Matrix
M		Maschenmatrix
R	Ω	Widerstand
R	Ω	Widerstand
S		Schnittmatrix
u	V	Spannung
u	V	Spannung
U	V	Spannung
τ	s	Zeitkonstante des Lichtbogen

Index	Benennung
C	Kapazitätszweig
B	Lichtbogen
B	Baumzweig
E	Spannungsquellezweig
J	Stromquellezweig
K	Knoten
L	Induktivitätszweig
L	Läufer
L1, L2, L3	Leiter 1, Leiter 2, Leiter 3
N	Nennwert
R	Widerstandzweig
s	Ständer
V	Verbindungszweig

Kapitel 5 bis 12

Vektorgroßen sind in { } gedruckt, Matrix in [] gedruckt, skalare Größen in Normalschritt.

Formelzeichen	Einheit	Benennung
A	m^2	Fläche des Querschnitts des Kanals
A	m^2	Fläche der Oberfläche
$\{A\}$	V.s/m	magnetisch Vektorpotential
$\{B\}$	V.s/m^2	magnetischen Flußdichte
c	$\text{J}/(\text{kg.K})$	spezifische Wärmekapazität
$\{E\}$	V/m	elektrischen Feldstärke
F		Formfaktor von Oberfläche
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
$\{H\}$	A/m	magnetischen Feldstärke
$\{J\}$	A/m^2	Stromdichte
L	m	Länge des Kanals
$\{L\}$		$\{\frac{\partial}{\partial X} \quad \frac{\partial}{\partial Y} \quad \frac{\partial}{\partial Z}\}^T$
P	Pa	Druck
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
$\{v\}$	m/s	Geschwindigkeit
V	V	elektrisch Skalarpotential
V	m/s	Geschwindigkeit
x, y, z		globale kartesische Koordinaten
σ		Stefan-Boltzmann-Konstante
ϵ		Effektiver Emissionsgrad der Oberfläche
∇		Vektoroperator Nabla
ρ	kg/m^3	Dichte
μ	Pa.s	dynamische Viskosität
$[\mu]$	$\text{V.s}/(\text{Am})$	magnetische Permeabilität

Anhang

Erklärung des Programms zur Pinch-Effekt-Berechnung

Das Programm besitzt eine Steuerdatei und 3 Macrodateien. Die Macrodatei fmknoten.mac berechnet die Knotenstellen am Anfang, wogegen die Macrodatei fmmag.mac das Magnetfeld, und die Macrodatei fmcfd.mac die Fluidodynamik berechnet.

1. Steuerdatei fm.lgw

Festlegung des Jobname:

/FILENAME,fm

Bereichsvereinbarung.

Festlegung der Anfangswerte aller Bereiche und Variablen.

Speicherung aller Parameter in die Datei PAR.parm:

PARSAV,ALL,PAR,parm

Aufruf der fmknoten Datei für die Berechnung aller Knotenstellen:

*USE,fmknoten.mac

Parameter von der Datei PAR.parm lesen:

PARRES,NEW,PAR,parm

Berechnung der Anfangswerte der Knotendrucke

Angabe der Ströme.

Beginn der Iteration.

Speicherung aller Parameter in die Datei PAR.parm:

PARSAV,ALL,PAR,parm

Aufruf der fmmag Datei für die Magnetfeldberechnung:

*USE,fmmag.mac

Aufruf der fmcfd Datei für die Fluidodynamikberechnung:

*USE,fmcfd.mac

Parameter von der Datei PAR.parm lesen:

PARRES,NEW,PAR,parm

Berechnung neuer Knotenstellen.

Speicherung aller Parameter in die Datei PAR.parm:

PARSAV,ALL,PAR,parm

Ende der Iteration

Ausgabe der Daten und Bilder.

2. Erzeugung der Macrodatei

Start des ANSYS Programms.

Wahl des Menüs Macro>Create macro file...

Eingabe des Dateinamens in das Felds '*Macrofilename*'.

Eingabe der Kommandos.

Klick auf 'OK' für die Speicherung der Datei.

Man kann die Macrodatei mit dem Texteditor bearbeiten.

3. Das Macro fmknoten.mac

Leerung der Datenbank:

/CLEAR

Parameter von der Datei PAR.parm lesen:

PARRES,NEW,PAR,parm

Berechnung der Knotenstellen des Flüssigmetallteils.

Berechnung der Knotenstellen des Isolatorteils.

Berechnung der Knotenstellen des Luftteils.

Speicherung aller Parameter in die Datei PAR.parm:

PARSAV,ALL,PAR,parm

4. Das Macro fmmag.mac

Festlegung des Jobname:

/FILENAME,fmmag

Leerung der Datenbank:

/CLEAR

Parameter von der Datei PAR.parm lesen:

PARRES,NEW,PAR,parm

Start des Preprocessors:

/PREP7

Festlegung des SOLID97 3D magnetischen Volumenelements:

ET,1,SOLID97 ! Elementtypnummer 1

Wahl der Freiheitsgrade für SOLID97: magnetisches Vektorpotential, elektrisches Skalarpotential:

KEYOPT,1,1,1

Keine Berücksichtigung des Geschwindigkeitseffekts:

KEYOPT,1,2,0

Festlegung des INFIN111-3D-Infiniten Randelements:

ET,2,INFIN111 ! Elementtypnummer 2

Wahl der Freiheitsgrade für INFIN111: magnetisches Vektorpotential:

KEYOPT,2,1,1

Wahl des 8-Knoten-INFIN111-Elements:

KEYOPT,2,2,0

Vorgabe der Permeabilitätszahl vom Material 1:

UIMP,1,MURX, , ,1,

Vorgabe des spezifischen Widerstandes vom Material 1:

UIMP,1,RSVX, , ,3.3e-7,

Vorgabe der Permeabilitätszahl vom Material 2:

UIMP,2,MURX, , ,1,

Vorgabe des spezifischen Widerstandes vom Material 2:

UIMP,2,RSVX, , ,1,

Vorgabe der Permeabilitätszahl vom Material 3:

UIMP,3,MURX, , ,1,

Erzeugung der Knoten des Flüssigmetallteils mit N Kommando. Erzeugung der Knoten des Isolarteils. Erzeugung der Knoten des Luftteils.

Festlegung der Materialnummer des Flüssigmetallelements:

MAT,1

Festlegung der Typnummer des Flüssigmetallelements:

TYPE,1

Erzeugung der Elemente des Flüssigmetalls mit E Kommando.

Festlegung der Materialnummer des Isolatorelements:

MAT,2

Festlegung der Typnummer des Isolatorelements:

TYPE,1

Erzeugung der Elemente des Isolators.

Festlegung der Materialnummer des Lufterlements:

MAT,3

Festlegung der Typnummer des Lufterlements:

TYPE,2

Erzeugung der Elemente der Luft.

Kennzeichnung der unendlichen Oberfläche:

NSEL,S,NODE,,11850,13325

SF,ALL,INF

Vorgabe einer Stromeingabeseite:

NSEL,S,NODE,,1,289

CP,6,VOLT,ALL

Vorgabe einer Stromausgabeseite:

NSEL,S,NODE,,9509,9797

D,ALL,VOLT,0

Beendigung des Preprocessors:

FINI

Start des Lösungsabschnittes mit

/SOLU

Wahl der neuen transienten Analyse:

ANTYPE,TRANS

Einstellung der Zeit:

TIME,h

Benutzung des automatischen Zeitschrittwertes:

AUTOTS,1

Angabe des Unterzeitschrittes:

NSUBST,30,50,15,0

Angabe der Sprunglast:

KBC,1

Eingabe der Anfangswerte der Freiheitsgrade: magnetisches Vektorpotential, elektrisches Skalarpotential mit IC Kommandos.

Eingabe des Stroms mit F Kommando.

Die Lösung wird gestartet mit

SOLVE

Beendigung des Lösungsabschnittes mit

FINISH

Start des Postprocessings mit

/POST1

magnetisches Vektorpotential, elektrisches Skalarpotential, magnetischer Kraft lesen mit *GET Kommando.

Berechnung die Kraftdichte auf den Knoten in N/m^3 .

Speicherung aller Parameter in die Datei PAR.parm:

PARSAV,ALL,PAR,parm

Beendigung des Postprocessings mit

FINISH

5. Das Macro fmkcfd.mac

Leerung der Datenbank:

/CLEAR

Parameter von der Datei PAR.parm lesen:

PARRES,NEW,PAR,parm

Die Festlegung des Jobname:

/FILNAM,FMCFD

Start des Preprocessors:

/PREP7

Aufruf des Elementtyps:

ET,1,FLUID142 ! Referenznummer 1

Erstellung aller Knoten.

Angabe der Materialnummer des Elements:

MAT,1

Angabe der Elementtypnummer:

TYPE,1

Erstellung aller Elemente.

Beendigung des Preprocessors:

FINI

Start des Lösungsabschnittes mit

/SOLU

Einschaltung des Algorithmus der transienten Lösung.

Einschaltung des Turbulenzmodells:

FLDATA1,SOLU,TURB,1

Angabe der Zeitschrittszahl:

FLDATA,TIME,NUMB,10

Angabe der Zeitschrittgröße:

FLDATA,TIME,STEP,h/10

Angabe der globalen Iterationsanzahl:

FLDATA,TIME,GLOB,1

Angabe der Häufigkeit der Ergebnisausgabe:

FLDATA,STEP,APPE,h

- Eingabe der Dichte, Oberflächenspannung und der Viskosität des Flüssigmetalls
- Eingabe der Erdbeschleunigung
- Festlegung der Anfangsbedingungen aller Knotengeschwindigkeiten

- Die Kraftdichte wird auf alle Knoten angewandt
Festlegung der Grenzsichtbedingungen für die Grenzknoten

Die Lösung wird gestartet mit
SOLVE

Beendigung des Lösungsabschnittes mit
FINISH

Start des Postprocessings mit
/POST1

Ausgabe der Daten und Bilder.

Speicherung aller Parameter in die Datei PAR.parm:
PARSAV,ALL,PAR,parm

Beendigung des Postprocessings mit
FINISH

Literaturverzeichnis

- [1] Friedrich, W.K., Hans, Fiedler: *Kurzschluß in Elektroenergiesystemen*, VEB Deutscher Verlag für Grungstoffindustrie, Leipzig, 1969
- [2] Stade, D., Schau, H.: Störlichtbögenschutz in Drehstrom-Niederspaungsanlagen durch schnelle Fehlererfassung und -beseitigung, 4. Kloeckner-Moeller Planer-Symposium, Nov. 1994
- [3] Schau, H., Stade, D.: Impacts of internal arcing faults in low-voltage switchgear assemblies and power systems, 28th universities power engineering conference, 1993,Stafford
- [4] Schau, H., Stade, D., Klöppel F.W.: Beherrschung von Störlichtbögen in Drehstrom-Niederspaungsanlagen, *Energietechnik*, April 1989, Heft 4,
- [5] DIN VDE 0102, *Berechnung von Kurzschlußströmen in Drehstromnetzen*,
- [6] Richard Roeper: *Kurzschlußströme in Drehstromnetzen*, Siemens AG, 1984
- [7] Koettnitz, H., Pundt, H.: *Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze*, VEB Deutscher Verlag für Grungstoffindustrie, Leipzig, 1968
- [8] Hadi, Saadat: *Power system analysis*, WCB/McGraw-Hill, 1999
- [9] Juan, A., Martinez-Velasco: *Computer analysis of electric power system transients : selected readings*, IEEE, 1997
- [10] Barret, J.-P., Bornard, P., Bertrand Meyer: *Power system simulation*, Chapman & Hall, 1997
- [11] Anderson, P.M.: *Analysis of Faulted Power Systems*, IEEE Press, USA, 1995
- [12] Lackey, C.H.W.: *Fault calculations : the calculation of currents and voltages resulting from faults in electrical power-system*, Edinburgh: Oliver & Boyd, 1951
- [13] Stade, D., Schau, H.: Spezielle Kurzschlußverhältnisse in Drehstrom-Niederspaungsanlagen, *Elektrie*, Berlin 40 (1986) 10
- [14] Stade, D., Schau, H.: Berechnung der minimalen Kurzschlußstroeme unter Beruecksichtigung von Störlichtbögen, *Elektropraktiker*, Berlin 38 (1984) 4

- [15] Schau, H., Stade, D.: Fehlerströme und Leistungsumsatz bei Lichtbogenkurzschlüssen im Niederspannungsbereich, 37. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 1992
- [16] Rempel, W.: Zu Entstehung und Ablauf von Lichtbogenkurzschlüssen in Drehstrom-Niederspannungsanlagen und deren mathatische Beschreibung, Dissertation, TU Ilmenau, 1987
- [17] Huang, S.M.: The calculation of short circuit currents in low voltage network, Chinese Power System, 1994, No.7
- [18] Kizilcay, M., Koch, K.-H.: Numerical Fault Arc Simulation Based on Power Arc Tests, ETEP Eur. Trans. on Electr. Power Engng. 1994, Vol. 4, No. 3
- [19] Arrillaga, J., Smith, B.: *AC-DC power system analysis*, IEE, London, 1998
- [20] Stade, D.: *Bedienungshinweise zum Salomon*, TU Ilmenau, 1995
- [21] Rajagopalan, V.: *Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems*, Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 1987
- [22] Guanyuan, Qiu: *Graph Theory*, Volkserziehungsverlag, 1978
- [23] Hamilton, H.B.: Implementation of a high speed, heavy current, dc switching system, University of Pittsburgh, Feb. 1968, USBM report #HO366013
- [24] Itoh, T., Miyamoto, T., Takano, N.: Permanent Power Fuse, Selt-recovering current limiting device, IEEE Summer Power Meeting, New York, 1970
- [25] Jones, N.D.: Harris, L.P. Design and development of a self-healing fuse, Contract NAS12-675, 1970
- [26] Itoh, T., Miyamoto, T., Wada, Y.: Design considerations on the permanent power fuse for a control center, IEEE Winter Meeting, New York, 1972
- [27] Ramos, T.J.: Analysis and design of interrupting and line sectionalizing schemes for heavy current DC circuits using current limiting devices, Dissertation, University of Pittsburgh, 1975
- [28] Hamilton, H. B.: Feasibility study of the use of current-limiting devices in interruption and sectionalizing of DC circuit in mines, University of Pittsburgh, Feb. 1976, USBM report #HO357079
- [29] Hamilton, H.B., Kirkland, S.R.: Tests have shown that a Na-K filled current limiting device has application potential as a reuseable off-line element of a fault current limiter in medium voltage power distribution system, Final report on Contract No. 3031-4-5-74 I-T-E Juni 1977, Gould Inc.
- [30] Mitsubishi: Permanent Power Fuses, Herstellerprospekt, 1980

- [31] Hamilton, H. B., Yenchek, M.R.: Development of a DC current-limiting and interrupting system for mines, Proceedings of the 6th WVU conference on coal mine electrotechnology, Morgantown, WV, USA, Juli 1982
- [32] Nakayama, H., Fukazu, T., Wada, Y.: Development of high voltage, self-healing current limiting element and verification of its operating parameters as a CLD for distribution substations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, Jan 1989
- [33] Degtjar, V.G.: Entwicklung der Grundlagen zur Theorie und Bau flüssigmetallischer Kontakte und Kontaktanordnungen, Dissertation, TU Moskau, 1990
- [34] Krüger, J.: Zum Stand der Modellierung des Betriebsverhaltens von Flüssigmetallschaltgeräten sowie zur deren Realisierung, interner Bericht, TU Ilmenau, 1998
- [35] Veretenkov, A.V.: Nikolaeva L. T. usw., Current Limiter, Patent SU922911, 23. Apr. 1982
- [36] Zienicke, E., Thess, A., Krätzschar, A.: Stability analysis of the liquid metal pinch using the shallow water approximation, interner Bericht, TU Ilmenau, Sept. 2001
- [37] Krätzschar, A.: Physikalische Grundlagen zur Dimensionierung von Strombegrenzern auf flüssigmetallischer Basis, Dissertation, TU Dresden, 2002
- [38] Grossmann, U.: Empirische Modelle für den Flüssigmetallstrombegrenzer, interner Bericht der Moeller GmbH, 2001
- [39] Bateman, G.: *MHD Instabilities*, MIT Press Cambridge, MA, 1978
- [40] Biskamp, D.: *Nonlinear Magnetohydrodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993
- [41] Lielpeteris, J.: Moreau, R.: *Liquid Metall Magnetohydrodynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 1989
- [42] Branover, H., Unger, Y.: *Progress in Fluid Flow Research: Turbulence and Applied MHD*, AIAA, 1998
- [43] Oswald, B.R.: *Berechnung transienter Vorgänge in Elektroenergieversorgungsnetzen*, VDE-Verlage GmbH, Berlin, 1996
- [44] Northrup, E.F.: Some newly observed manifestations of forces in the interior of an electric conductor, Phys. Rev., 24(1907)
- [45] Huang, H.: *Strombegrenzung durch Lichtbögen in engen Spalten*, VDI-Verlage, ISSN 0178-9481, 1992
- [46] Erk, A., Schmelzle, M.: *Grundlagen der Schaltgerätetechnik*, Springer-Verlage, Berlin, 1974
- [47] Rieder, W.: *Plasma und Lichtbogen*, Vieweg-Verlage, Braunschweig, 1967

- [48] Klaus, A.: *Optische Störlichtbogendetektion in luftisolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen*, Ilmenau: ISLE, 2001
- [49] Schäfer, H.: *Ein Beitrag zur Gewährleistung eines wirksamen Störlichtbogenschutzes in Drehstrom-Niederspannungsschalt- und -verteileranlagen durch eine schnelle und sichere Störlichtbogenerkennung*, Dissertation, TU Ilmenau, 1995
- [50] ANSYS Inc., *ANSYS Manual*, 2001
- [51] Klaus, Gersten: *Einführung in die Strömungsmechanik*, Vieweg, 6. überarbeitete Auflage, 1992
- [52] Mueller, G., Groth, C.: *FEM für Praktiker-Band 1: Grundlagen*, expert Verlage, 5. aktualisierte Auflage, 2000
- [53] Huaren, Wu.: Berechnung von Lichtbogenkurzschlußströmen im Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer, Technischer Bericht, TU-internes Bericht, TU Ilmenau, FG EEV, 2003
- [54] Tufts University: Gourmet Engineering Lecture Notes, *http* :
 //www.tufts.edu/as/tampl/en43/lecture_notes/ch5.html
- [55] SMC/AX Directorate of Systems Acquisition: Convection, *http* : *//ax.losangeles.af.mil*

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials haben mir keine Personen entgeltlich / unentgeltlich geholfen.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Ilmenau, 26. März 2004

Huaren Wu

Thesen

1. Kurzschlüsse sind im Allgemeinen mit dem Ent- und Bestehen eines Lichtbogens, auch Störlichtbogen genannt, zwischen betroffenen Anlagenteilen verbunden. Statistisch handelt es sich bei ca. 80 bis 95% der Kurzschlüsse um Lichtbogenkurzschlüsse. Aus dieser Tatsache heraus und, um Aussagen hinsichtlich der Anlagenprojektierung einschließlich bestimmter Schutzmaßnahmen zu erhalten, ist die Berechnung diesbezüglicher Kenngrößen erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Algorithmus zur Berechnung von Lichtbogenkurzschlussströmen im Elektroenergieversorgungssystem abgeleitet und rechen technisch umgesetzt.

2. Um Drehstromasynchronmaschinen mit dem Wechselstrommodell anderer Elemente im Differentialgleichungssystem verbinden zu können, wird ein mathematisches Modell der Asynchronmaschine nach der von Oswald dargestellten mathematischen Transformation abgeleitet. Die Koeffizienten der Ständergleichungen sind konstant, was zu vergleichsweise kleinen Rechenzeiten bei der Lösung der Systemgleichungen führt.

3. Ein weiteres mathematisches Modell wird bezüglich der dreipoligen Lichtbogen spannungen abgeleitet. Dieses Modell beschreibt die logische Beziehung zwischen Lichtbogenspannungen und Leiterströmen. Es bietet zudem die Möglichkeit der Berechnung der minimalen dreipoligen Lichtbogenkurzschlußströme.

4. Zur Aufstellung der Zustandsgleichungen des Elektroenergieversorgungssystems wird ein Algorithmus abgeleitet. Dieser enthält die Formulierung des Normalbaums, die Bildung der Inzidenzmatrix, die Ableitung der Schnittmatrix und die Formulierung der Zustandsgleichung. Eine Veröffentlichung von V Rajagopalan beschreibt das Prinzip der Aufstellung der Zustandsgleichungen des Leistungselektroniksystems. Alle Gleichungen des Algorithmus zur Aufstellung der Zustandsgleichungen des Elektroenergieversorgungssystems wurden nach diesem Prinzip ausführlich abgeleitet.

5. Zur Berechnung der Spannungen zwischen Knoten und Bezugsknoten wird eine entsprechende Beziehung hergeleitet.

6. Das Rechenprogramm LBKSTools wurde mit VC++ geschrieben. Es ist in der Lage, die Ströme sowohl bei metallischen Kurzschlüssen als auch bei Lichtbogenkurzschlüssen im Energieversorgungssystem zu berechnen. Das System besteht aus Kondensatoren, Filtern, Leitungen, Kabeln, Drosseln, Belastungen, Netzeinspeisungen, Transformatoren, Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen. Das Programm kann Systeme mit beliebig komplizierten Strukturen analysieren. Als Anwender kann man die Daten des zu analysierenden Systems auf einfache Art und Weise eingeben und die Rechenergebnisse grafisch darstellen bzw. ausdrucken.

7. Für zwei bestehende Strukturen von Flüssigmetallstrombegrenzern wird das jeweilige Temperaturfeld berechnet, um die Abhängigkeit des Betriebsverhaltens des Begrenzers von der Temperatur des Flüssigmetalls beschreiben zu können. Durch die Analyse der

Änderung der Temperatur und des Stromverlaufs werden die verschiedenen Strombegrenzungsprinzipien der zwei Strukturen ermittelt. Der Strombegrenzer mit Quecksilber und Kolben begrenzt den Kurzschlußstrom wegen der Entstehung des Lichtbogens im Kanal. Der Strombegrenzer mit GaInSn und Luftraum begrenzt den Kurzschlußstrom wegen der Entstehung des Pinch-Effekts und Lichtbogens im Kanal.

8. Die Berechnung des Druckfeldes und des Pinch-Effekts des GaInSn-Strombegrenzers mit einem neuen Modell wird ausführlich dargestellt bzw. beschrieben. Dabei werden die Wandeekte des Kanals des Begrenzers berücksichtigt. Während der Pinch-Effekt-Berechnung wird die Luftwirkung berücksichtigt. Zur Berechnung des Druckfeldes und des Pinch-Effekts werden das Magnetfeld und das Strömungsfeld ermittelt. Zur Bestimmung der magnetischen Kraftdichte wird auf experimentell ermittelte Ströme zurückgegriffen.

9. Die im numerischen Berechnungsmodell verwendeten wichtigen Programmbefehle werden benannt und erklärt. Die Feldverteilungen und die Änderungen der Geschwindigkeit des Flüssigmetalls werden vorgestellt.

10. Hinsichtlich der Berechnung von Strömen in einem Elektroenergieversorgungssystem mit Flüssigmetallstrombegrenzer wird ein Widerstands-Modell des Flüssigmetallstrombegrenzers abgeleitet. Drei wichtige Zeitpunkte werden als Parameter des Modells selektiert. Die Parameter des Modells werden durch Versuchsergebnisse bestimmt. Die drei Zeitpunkte gehorchen linearen Beziehungen. Zum Nachweis der Genauigkeit des Modells werden die simulativ ermittelten Ströme mit denen, die gemessenen wurden verglichen.

11. Die Gleichungen für die Bestimmung der Parameter des Widerstand-Modells wurden mit Hilfe der Druckfeldberechnung abgeleitet. Man kann ein elektrisches Netzwerk, das einen Flüssigmetallstrombegrenzer enthält, ohne Feldberechnung berechnen.

12. Auf der Basis experimentell ermittelter Daten wird die Selektivität des Flüssigmetallstrombegrenzers analysiert. Es wurde gefunden, dass der Flüssigmetallstrombegrenzer gute Selektivitätseigenschaften aufweist.

13. Die Leistungsverluste des Flüssigmetallstrombegrenzers werden analysiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass diese bei normalem Betrieb zu groß sind. Eine Verminderung der Leistungsverluste lässt sich über die Veränderung der Geometrie des Flüssigmetallstrombegrenzers erzielen.

14. Ebenfalls auf der Grundlage vorliegender experimentell ermittelter Daten wird der Einfluss der Anzahl der Diaphragmen im Flüssigmetallstrombegrenzer untersucht. Die Strombegrenzungswirkung und die Anzahl der Diaphragmen sind nicht proportional. Die Anzahl der Diaphragmen möglichst gering sein.